

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Testes e Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar

Daniel Tiago Pinto Alves Castro dos Santos

Mestrado em Engenharia Biomédica

Orientador: Prof. Doutor Miguel Fernando Paiva Velhote Correia

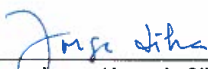
Outubro de 2016

A Dissertação intitulada

“Testes e Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar”

foi aprovada em provas realizadas em 24-10-2016

o júri


Presidente Prof. Doutor Jorge Alves da Silva
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Informática da FEUP - U.Porto


Prof. Doutor Vítor Hugo Mendes Costa Carvalho
Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico do Cávado e do Ave


Prof. Doutor Miguel Fernando Paiva Velhote Correia
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da FEUP - U.Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.


Autor - Daniel Tiago Pinto Alves Castro dos Santos

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Testes e Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar

Daniel Tiago Pinto Alves Castro dos Santos

Mestrado em Engenharia Biomédica

Outubro de 2016

Resumo

Nesta dissertação foram realizados testes e calibrações a um sistema medidor de pressão plantar. Primeiramente efetuou-se um enquadramento do tema, analisando-se a importância da pressão plantar e os sistemas de medição relacionados. Chegou-se à conclusão que a calibração destes sistemas é extremamente importante, e que deveria ser melhorada com o apoio de uma estrutura teórica, metodológica e procedimental generalizável da operação. A primeira parte da dissertação focou-se na revisão bibliográfica sobre o tema da calibração, estabelecendo-se consenso acerca do seu significado e desenvolvendo-se a referida estrutura. A segunda parte focou-se na demonstração de aplicabilidade da mesma, realizando-se os referidos testes e calibrações ao sistema. Foram utilizados diferentes métodos de calibração para efeitos de comparação. No final, o sistema utilizado revelou não ser adequado para medições quantitativas, mas sim para avaliações qualitativas de pressão. Apesar disso, a estrutura poderá ser uma ferramenta útil e eficaz na calibração de qualquer sistema medidor.

Abstract

A plantar pressure measuring system was tested and calibrated in this dissertation. Initially, a theoretical analysis of the importance of plantar pressure and related measuring systems was made. This analysis led to the conclusion that calibration is extremely important in such systems and could be improved with a supportive theoretical, methodological and procedural framework of the operation. The first stage of the work was focused on a literature review of calibration, establishing a consensus on its meaning and developing the referred framework. In the second stage of the work, its aplicability was demonstrated on the plantar pressure measuring system. It was concluded that the system was not suited for quantitative measurements, but qualitative avaliations of pressure. However, the developed framework might be a useful tool for an efficient calibration of any given measuring system.

Agradecimentos

Queria deixar os meus agradecimentos às seguintes pessoas:

- Ao professor Miguel Velhote Correia, pela sua disponibilidade, colaboração, conselhos e capacidade de encaminhar o desenvolvimento dos trabalhos pelo melhor caminho.
- Aos colaboradores da Kinematix, pelo fornecimento das palmilhas medidoras de pressão e do dispositivo TUNE.
- Ao Nuno Viriato e à Viviana Pinto, responsáveis pela máquina dos ensaios mecânicos, que se disponibilizaram para me acompanhar durante a realização dos mesmos.

Daniel Santos

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e Motivação	1
1.1.1	Importância da Pressão Plantar	1
1.1.2	Sistemas de Medição de Pressão Plantar	2
1.1.3	Importância da Calibração dos Sistemas	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	Calibração de Sistemas de Medição	5
2.1	Introdução	5
2.2	Conceitos Gerais de Metrologia	5
2.3	Significado de Calibração	6
2.4	Procedimento Geral de Calibração	10
2.5	Condições e Requisitos Prévios	12
2.6	Testes Experimentais	15
2.7	Modelação do Comportamento do Sistema	18
2.7.1	Generalização do Modelo	18
2.7.2	Modelos Lineares	20
2.7.3	Modelos Polinomiais	21
2.7.4	Modelos de Funções Generalizadas	23
2.7.5	Modelos de Funções Segmentadas	26
2.7.6	Modelos Multidimensionais	28
2.7.7	Modelos Explicativos	30
2.8	Implementação e Utilização do Modelo	32
2.9	Verificação e Finalização	33
2.10	Considerações Finais do Capítulo	35
3	1º Passo da Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar	39
3.1	Introdução	39
3.2	Objetivos	39
3.3	Descrição do Sistema	39
3.4	Planeamento dos Testes Experimentais de Calibração	43
3.5	Teste Dinâmico	47
3.5.1	Metodologia	47
3.5.2	Análise de Resultados	49
3.6	Teste Estático	57
3.6.1	Metodologia	57
3.6.2	Análise de Resultados	58

3.7	Considerações Finais do Capítulo	62
4	2º Passo da Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar	63
4.1	Introdução	63
4.2	Objetivos	63
4.3	Desenvolvimento do Modelo de Medição	63
4.3.1	Metodologia	63
4.3.2	Análise de Resultados	69
4.4	Implementação do Modelo	75
4.5	Teste de Verificação da Calibração	76
4.5.1	Metodologia	76
4.5.2	Análise de Resultados	78
4.6	Considerações Finais do Capítulo	88
5	Conclusão	89
	Referências	91

Lista de Figuras

2.1	Modelo geral da calibração de um sistema de medição.	10
2.2	Modelo geral de um sistema de medição funcional.	12
2.3	Equipamento trublu [®] (Novel).	14
2.4	Diagrama do procedimento das operações de calibração, ajuste e verificação. . .	37
3.1	Diagrama dos elementos do sistema de medição.	40
3.2	Palmilhas sensíveis.	42
3.3	Dispositivo TUNE.	42
3.4	Máquina de ensaios mecânicos.	46
3.5	Blocos de compressão.	46
3.6	Sinal da pressão exercida nos ensaios do teste dinâmico.	47
3.7	Curva de resposta do sistema.	50
3.8	Efeito de escada no sinal de tensão.	51
3.9	Filtragem do sinal de tensão.	52
3.10	Relação entre a pressão e a tensão.	53
3.11	Pontos de calibração obtidos de forma dinâmica.	54
3.12	Variabilidade de resposta do sensor.	55
3.13	Gráficos da histerese do sensor.	56
3.14	Gráfico dos pontos de calibração obtidos de forma estática.	59
3.15	Drift do sinal de tensão.	61
4.1	Curvas das funções de medição obtidas por interpolação.	71
4.2	Curvas das funções de medição obtidas por regressão.	72
4.3	Gráfico de comparação das funções obtidas por interpolação.	73
4.4	Gráfico de comparação das funções obtidas por regressão.	74
4.5	Diagrama do sistema, incluindo o modelo de medição.	75
4.6	Sinal da pressão exercida nos ensaios de verificação do 1º tipo.	77
4.7	Sinal da pressão exercida nos ensaios de verificação do 2º tipo.	77
4.8	Resultados de medição ao longo de um ensaio de verificação do 1º tipo.	82
4.9	Pressão estimada em função da verdadeira, obtidas a partir de um ensaio de verificação do 1º tipo.	83
4.10	Resultados de medição ao longo de um ensaio de verificação do 2º tipo.	85
4.11	Pressão estimada em função da verdadeira, obtidas a partir de um ensaio de verificação do 2º tipo.	86
4.12	Comparação entre as curvas de resposta do sistema obtidas em diferentes testes. .	87

Lista de Tabelas

2.1	<i>Look-up table</i>	27
3.1	Histerese máxima e média do sensor.	53
3.2	Pressões de ativação e desativação do sensor.	54
3.3	Pressões exercidas nos ensaios do teste estático.	57
3.4	Pontos de calibração obtidos de forma estática.	58
3.5	Taxa de <i>drift</i> do sensor.	60
4.1	Parâmetros das funções de medição obtidos por interpolação.	70
4.2	Parâmetros das funções de medição obtidos por regressão.	70
4.3	Erro absoluto de medição com as diferentes metodologias de calibração.	81
4.4	Erro absoluto de medição com as diferentes funções.	83
4.5	Erro absoluto de medição com os métodos de interpolação e regressão.	84
4.6	Incerteza de medição com os diferentes métodos de calibração.	84
4.7	Resultados da utilização do algoritmo de compensação de histerese.	84
4.8	Resultados da utilização do algoritmo de compensação de drift.	84

Abreviaturas e Símbolos

FSR	<i>Force Sensing Resistor</i> (resistência sensível à força)
®	<i>Registered Trademark</i> (marca registrada)
™	<i>Trademark</i> (marca não registrada)
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

1.1.1 Importância da Pressão Plantar

O pé humano é uma fenomenal obra-prima da engenharia da vida, construída e aperfeiçoada ao longo de milhões de anos pelos mecanismos naturais da evolução. A sua intrincada estrutura anatómica apresenta um nível de complexidade admirável, sendo até contemplada por Leonardo Da Vinci como um extraordinário objeto artístico. Os pés são como raízes errantes do corpo humano, pois estabelecem a interface que nos conecta ao solo e sustentam a locomoção do nosso organismo. A sua superfície inferior encarrega-se da árdua tarefa de suportar a totalidade do peso do corpo, travando uma constante luta contra as hostilidades da força gravítica. Mas os tecidos biológicos da planta do pé estão preparados para resistirem às exigentes solicitações mecânicas geradas durante as atividades da pessoa, quer seja a caminhar, a correr ou a saltar, ao longo de toda a sua vida. Porém, existem limites físicos e fisiológicos que se impõem sobre a saúde da planta do pé. Tais condições adversas sujeitam-na a esforços significativos que em excesso poderão provocar lesões temporárias ou permanentes, principalmente se estiver debilitada ou se for utilizada indevidamente acima dos seus limites. Assim como qualquer outra estrutura, o pé também pode acabar por ceder sob stress. Como forma de evitar que isto aconteça, a Engenharia Biomédica desenvolve soluções para avaliar os efeitos prejudiciais referidos. Assim nasce a importância da medição da pressão plantar.

Um dos maiores problemas causados pelo excesso de pressão plantar são as chamadas lesões do pé diabético. Devido à sua doença, estes pacientes estão particularmente mais suscetíveis a sofrerem ulcerações neuropáticas e vasculares na planta do pé, sendo graves e dolorosas [1]. A incidência da diabetes a nível mundial é extremamente elevada e cresce rapidamente. Estima-se que 366 milhões de pessoas estarão afetadas até 2030 [2]. Cerca de 15% destas desenvolvem as lesões referidas, ficando sujeitas a um alto risco de amputação [3]. Pacientes com a doença de Hansen ou artrite reumatoide também sofrem devido ao mesmo fator, sendo afetados por problemas semelhantes [4]. A necessidade de previsão e estudo da causa deste tipo de lesões leva os especialistas a avaliarem a pressão plantar, pois é o denominador comum a todas. Apenas assim conseguem

prevenir o desenvolvimento das mesmas, realizando diagnósticos atempadamente, minimizando os riscos para a saúde e melhorando a qualidade de vida de um vasto número de pacientes. Durante o desenvolvimento de calçado ortopédico para estes, a avaliação da distribuição de pressão sobre a palmilha também é um fator essencial [5]. Este calçado impede que a pressão seja demasiado localizada, diminuindo o risco das lesões referidas.

Estudos de análise de marcha também beneficiam consideravelmente com medições da pressão plantar. Observando a sua distribuição durante a locomoção, é possível avaliar deformações, disfunções ou lesões, que se evidenciam através de alterações em relação aos padrões de uma pessoa normal [6]. O balanço, equilíbrio ou postura de pessoas, principalmente idosas e debilitadas, também pode ser avaliado com base em informações semelhantes [5]. Este tipo de estudos também favorece a reabilitação de pacientes com hemiplegia ou paralisia cerebral. Outra utilidade da avaliação da pressão é o design de próteses de membros inferiores para atletas paralímpicos [7].

Para além de fins clínicos, a avaliação da pressão plantar também é um fator importante no desporto. No futebol, por exemplo, estes estudos podem ajudar os futebolistas em questões de equilíbrio [5]. No caso dos corredores de alta competição, a forma como apoiam o pé no solo durante o movimento é um aspeto crucial do seu desempenho. A análise das cargas exercidas no pé durante as corridas permite que estes atletas melhorem a sua performance e obtenham melhores resultados [5]. Ainda numa vertente desportiva, mas não de competição, hoje em dia grande parte da população é praticante de exercício físico, com vista a manter um estilo de vida saudável. Um dos treinos mais comuns é a corrida. Ao utilizarem equipamentos de medição da pressão plantar conseguem obter *feedback* sobre as sessões de corrida. Isto permite-lhes entender aspetos corretos e incorretos do seu desempenho. É essencial que saibam correr melhor para maximizarem os benefícios para a saúde e minimizarem os riscos de lesões.

A pressão plantar revela ser uma valiosa fonte de informação, sendo o fator chave que está na origem de inúmeras enfermidades. Especialistas em áreas de saúde e desporto estudam-na com o objetivo de realizarem melhores diagnósticos, desenvolverem terapias e reabilitações, manterem a saúde e bem-estar dos pacientes, desenvolverem calçado e próteses de membros inferiores e melhorarem o desempenho de desportistas.

1.1.2 Sistemas de Medição de Pressão Plantar

A medição da pressão plantar requer sistemas especialmente desenvolvidos e apropriados para as aplicações referidas. Apesar do objetivo comum a todos ser a medição da pressão na planta do pé, existem imensos métodos e tecnologias envolvidos no processo. Os sensores utilizados pelos sistemas são geralmente do tipo resistivo, capacitivo, piezoelétrico ou de efeito de Hall [5]. Atualmente há uma grande variedade de sistemas disponíveis comercialmente, oferecendo inúmeras possibilidades de aplicação. Estes dividem-se em dois tipos principais: os de plataforma e os agregados ao calçado. Nos primeiros, as plataformas são constituídas por matrizes de sensores de pressão. Estas montam-se no chão, sendo lisas e rígidas. O utilizador pode caminhar ou ficar em pé sobre elas. O sistema encarrega-se de fornecer as distribuições de carga ou força exercidas no

pé [6]. No mercado estão disponíveis vários sistemas de plataforma, incluindo o emed[®] (Novel¹), o posturo footpat[®] (Novel), o paroGraph[™] (Paromed²) e o AccuGait[™] (prophysics SOL³). Nos sistemas agregados ao calçado, o equipamento fica acoplado à parte externa do mesmo ou ao próprio utilizador. Este deve ser portátil e pequeno, de modo a não ser incómodo. Os sensores que medem a pressão são palmilhas que se colocam entre o pé e o calçado [5]. No mercado estão disponíveis vários sistemas deste tipo, incluindo o paroTec[™] (Paromed), o pedar[®] (Novel), o pedoped[®] (Novel), o F-Scan[™] (Tekscan Inc⁴) e o Foot Pressure Mapping System (Pressure Profile Systems⁵).

Os sistemas de medição da pressão plantar revelam ser uma ferramenta indispensável para os especialistas de saúde e desporto, ajudando-os a atuar nos problemas referidos anteriormente. É essencial que estes profissionais depositem confiança nas medições realizadas e não sejam induzidos em erro. Logo, é imprescindível que os sistemas garantam aos seus utilizadores qualidade e fiabilidade. Mas estes aspetos não ficam assegurados para sempre. Os medidores são frequentemente sujeitos a condições adversas e esforços significativos, durante a sua utilização normal. Devido a estes efeitos nefastos ao longo do tempo, os componentes acabam por sofrer desgastes, perder propriedades, alterar características e ficar desajustados. É inevitável que eventualmente se perca a garantia de qualidade que tinham inicialmente. As medições fornecidas deixam de ser corretas e perdem a sua fiabilidade. A solução é verificar regularmente se os sistemas cumprem os requisitos estipulados e tomar medidas apropriadas caso contrário. Isto envolve principalmente a operação de calibração.

1.1.3 Importância da Calibração dos Sistemas

A operação de calibração é fundamental para garantir a qualidade dos sistemas de medição de pressão plantar. Espera-se que no fim de uma calibração e eventual ajuste, o sistema produza medições corretas com grande exatidão e precisão, tornando-se válido e apto para as suas funções. É fundamental garantir tal qualidade para que os sistemas ajudem efetivamente os especialistas a avaliarem a pressão plantar, trazendo grandes benefícios para a saúde de inúmeros pacientes e para o desempenho de desportistas. Atingir este objetivo é evidentemente de extrema importância. Por este motivo, operação de calibração deve ser realizada sob as melhores condições possíveis e seguindo metodologias adequadas a cada sistema. Os fabricantes dos sistemas normalmente disponibilizam protocolos, equipamentos e *software* específicos para se executarem tais tarefas. No entanto, se existisse uma estrutura teórica e procedimental generalizável a qualquer sistema, a calibração seria efetuada de forma muito mais rápida, simples e eficaz. Dada a importância e a frequência da operação, seria bastante conveniente se se melhorasse a sua execução.

¹<http://www.novel.de/novelcontent/>

²<http://www.paromed.biz/>

³<http://www.prophysics-sol.se/>

⁴<https://www.tekscan.com/>

⁵<http://www.pressureprofile.com/>

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver uma estrutura de apoio para a operação de calibração, demonstrando a sua aplicabilidade num sistema medidor de pressão plantar. O sistema que será utilizado baseia-se no dispositivo TUNE, desenvolvido pela Kinematix⁶ e especialmente pensado para atividades desportivas de corrida. Pretende-se que no final o sistema se torne apto e funcional para efeitos de medição de pressão.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em cinco capítulos organizados de forma lógica e coerente.

O segundo capítulo engloba a revisão bibliográfica. O principal tema abordado é a calibração de sistemas de medição. Inicialmente são esclarecidos alguns conceitos essenciais relacionados com metrologia e também é explicado o significado de *calibração*. De seguida é apresentado um modelo geral do procedimento de calibração. A partir daí, ao longo do capítulo são explicadas as principais metodologias envolvidas na operação, seguindo a sequência natural de tarefas.

Todo o trabalho de calibração realizado ao sistema medidor de pressão plantar encontra-se descrito ao longo dos capítulos três e quatro. Estes correspondem aos dois passos principais da operação, seguindo a ordem natural de tarefas. A metodologia envolvida encontra-se devidamente explicada e os resultados produzidos são apresentados e analisados em ambos os capítulos.

O quinto capítulo corresponde à conclusão geral da dissertação.

⁶<https://www.kinematix.pt/>

Capítulo 2

Calibração de Sistemas de Medição

2.1 Introdução

A medição é um dos pilares da ciência e tecnologia. É fundamental que os sistemas utilizados sejam fiáveis e de qualidade, apresentando medições corretas, exatas e precisas, de modo a que as observações realizadas não induzam em erro. A garantia destes aspetos parte principalmente do processo de calibração a que os sistemas são submetidos. Para cada sistema em específico, pretende-se que sejam utilizadas as melhores e mais adequadas metodologias e desempenhados os procedimentos de forma ideal. Apenas assim se conseguem atingir os objetivos referidos. Antes de se realizar tal operação, é essencial compreender a terminologia associada (secção 2.2) e esclarecer o que realmente significa “calibrar” (secção 2.3). Apesar do procedimento de calibração ser bastante específico para cada sistema, pode ser entendido concisamente a partir de um modelo generalista (secção 2.4). Antes de se iniciar o procedimento, convém que se reúnam certas condições e requisitos prévios (secção 2.5). Reunidos estes aspetos, pode-se então iniciar o procedimento com uma fase de testes experimentais executados ao sistema de medição (secção 2.6). Com base nas informações obtidas nos testes, prossegue-se então para a fase seguinte de modelação do comportamento do sistema (secção 2.7). Este modelo é essencial para se produzirem efetivamente medições. Apesar do procedimento de calibração ficar terminado neste ponto e ser o foco principal deste documento, consideraram-se ainda mais duas pequenas fases devido à sua importância. Na fase seguinte deixa-se o domínio da calibração e entra-se no do ajuste, implementando o modelo desenvolvido para ser utilizado pelo sistema (secção 2.8). Na fase final é verificado se o sistema atinge os objetivos e cumpre certos requisitos estipulados (secção 2.9). A secção final 2.10 resume e conclui tudo o que foi abordado ao longo do capítulo, apresentando ainda um diagrama conciso de todo o procedimento.

2.2 Conceitos Gerais de Metrologia

Ao longo deste documento será efetuada uma abordagem da calibração no âmbito da metrologia. Todo o vocabulário associado e relevante ao tema referido será empregado de forma trivial

para fazer alusão aos conceitos relacionados que se pretendem exprimir. Uma explicação prévia deste conjunto de palavras técnicas torna-se indispensável para estabelecer consenso e compreensão dos assuntos falados. O Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [8] será a fonte bibliográfica principal, devido a ser um documento redigido por várias organizações internacionais que procuram padronizar a terminologia da metrologia.

A metrologia é, segundo a mais simples e concisa das explicações, a ciência da medição. Entenda-se medição como o processo experimental que tem como objetivo obter o valor de uma determinada grandeza¹. A palavra grandeza refere-se a uma propriedade de um objeto, fenómeno ou evento cuja magnitude pode ser expressa sob a forma numérica e com respeito a uma referência. Uma referência é um termo de comparação, podendo corresponder a uma unidade de medida, procedimento de medição e/ou um material modelo. As unidades de medida são grandezas bem definidas e adotadas por convenção, com as quais se pode comparar qualquer outra grandeza do mesmo tipo. O sistema internacional de unidades (SI) é largamente utilizado e convencionalmente aceite como referência nas medições de grandezas.

O termo “sistema de medição” será frequentemente empregado, referindo-se a qualquer tipo de agregado de elementos interdependentes a funcionarem como um todo com o objetivo de produzir medições de uma ou várias grandezas. O conceito inclui transdutores, sensores, transmissores, aparelhos, dispositivos, instrumentos e medidores, quer analógicos, quer digitais, com qualquer tipo de princípio de funcionamento subjacente. A grandeza alvo de medição por parte de um sistema denomina-se de mensuranda. Qualquer valor medido é sempre uma aproximação do verdadeiro valor da mensuranda (que é inevitavelmente indeterminado por natureza). A exatidão do sistema corresponde ao grau de concordância entre estes dois valores, refletindo a sua habilidade de fornecer resultados corretos. A incerteza é um intervalo à volta do valor medido dentro do qual o verdadeiro valor da mensuranda é provável de se encontrar. Todas as medições possuem uma incerteza intrínseca, resultado da quantidade finita de detalhe e intangibilidade do verdadeiro valor das grandezas.

2.3 Significado de Calibração

A palavra *calibração* é derivada do substantivo *calibre*. A sua origem remete para a palavra Árabe *qalib* (século XVI), que significava “um molde para fundição” de metal, aplicada no contexto de fabrico de balas ou armas. Este significado sofreu alterações até ao final do mesmo século, passando a referir-se ao “diâmetro interno do cano de uma arma”, que é um aspeto de tal fabrico. O termo *calibração* referia-se assim aos meios utilizados para se determinar o *calibre* de uma arma. [9]. Esta relação ainda é encontrada em algumas das definições atuais da palavra, sendo utilizada para expressar o diâmetro de objetos cilíndricos (tubos, canos, projéteis).

O significado de *calibração* entretanto evoluiu e adaptou-se a outros contextos. Atualmente é um conceito inserido na metrologia e relacionado com o funcionamento de sistemas de medição. Percorrendo a literatura, é possível encontrar imensas definições de *calibração*. Esta variedade é

¹ A tradução correta para a língua inglesa é *quantity*.

devida a uma tendência por parte dos autores: a explicação do conceito focando-se na sua contextualização. Como existem inúmeros tipos de sistemas de medição e métodos de os calibrar, cada autor acaba por definir o termo com base na sua experiência de aplicação prática. Por um lado, esta forma de explicar simplifica a compreensão por parte do leitor, mas por outro lado, surgem muitas definições não generalizáveis, podendo parecer que não há consenso sobre o que realmente significa “calibrar”. O VIM [8] procura estabelecer o consenso acerca deste assunto, apresentando possivelmente a definição mais completa e generalizável que se pode encontrar:

Calibração

“Operação que, sob condições especificadas, num primeiro passo, estabelece a relação entre os valores da grandeza com incertezas de medição provenientes de padrões e as indicações correspondentes com incertezas de medição associadas e, num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de medição a partir de uma indicação.” [8]²

Numa análise geral da definição, compreende-se à partida que calibrar consiste na execução metódica de um procedimento que visa observar, analisar e estabelecer certas relações num sistema de medição. Esta é uma operação que envolve metodologias distintas para cada sistema em específico, daí necessitar de ser executada “sob condições especificadas”. A operação pode ser dividida em dois passos sequenciais. É possível então efetuar uma análise mais minuciosa de cada passo:

1. Entenda-se o primeiro passo como o estabelecer de uma relação entre a mensuranda e as correspondentes respostas do sistema. É frequentemente considerado como a fase de caracterização do sistema. Esmiuçando a definição, compreende-se melhor esta ideia:
 - os “valores de grandeza” referem-se a valores conhecidos da mensuranda a que o sistema é submetido durante a operação. Este conhecimento da grandeza é obtido a partir de outro sistema de medição previamente ajustado e calibrado segundo padrões de qualidade. Assim garante-se que os valores medidos possuem “incertezas provenientes de padrões”, podendo ser considerados como os verdadeiros valores da mensuranda e utilizados como referências de comparação com os valores medidos pelo sistema sob calibração.
 - as “indicações” referem-se às respostas do sistema, que alteram em função da mensuranda. Estas são normalmente representadas pela posição de um ponteiro num mostrador analógico ou por um valor num ecrã digital. É importante salientar que as indicações são valores de grandeza fornecidos pelo sistema e podem não corresponder a valores da grandeza medida (ambas podem ser de naturezas distintas). Por outras palavras, indicações fornecem informação acerca da mensuranda, mas não são necessariamente medições da mesma (isto verifica-se particularmente em sistemas nunca

²definição adaptada das versões luso-brasileira e portuguesa do VIM

antes calibrados). Para além disto, é preciso ter em consideração que as indicações possuem “incertezas de medição associadas”, ou seja, há sempre limitações intrínsecas ao sistema que introduzem incerteza nos valores indicados.

2. Entenda-se o segundo passo como o estabelecer de uma relação que produza estimativas do valor da mensuranda a partir das respostas do sistema. É importante referir os seguintes aspetos:

- a operação “usa [a] informação” obtida anteriormente para estabelecer uma nova relação. No primeiro passo relacionaram-se as indicações em função de valores conhecidos da mensuranda. Neste passo, a relação anterior é invertida para se produzirem estimativas de valores desconhecidos da mensuranda simplesmente “a partir [das indicações]” fornecidas. Deste modo, consegue-se efetivamente realizar medições. Esta nova relação pode também ser considerada como a atribuição de uma escala de medida às indicações.
- a nova relação permite produzir “resultado[s] de medição”, que são valores de grandeza atribuídos à mensuranda, expressos em conjunto com a incerteza de medição associada (caso não seja negligenciável). Estes valores representam sempre aproximações ou estimativas dos verdadeiros valores da grandeza.

Resumindo esta análise da definição, calibrar consiste em estabelecer a relação entre valores conhecidos da mensuranda e as indicações correspondentes fornecidas pelo sistema. Com base nesta informação, então forma-se uma nova relação que é utilizada para se produzirem estimativas de valores desconhecidos da mensuranda em função das indicações. Esta definição realça a ideia de que calibrar é uma condição necessária para poderem ser efetuadas medições com um sistema indicador (nunca antes calibrado) [10]. Aqui encontra-se evidenciado o objetivo principal da calibração.

No final do segundo passo da calibração, resulta uma relação que produz resultados de medição a partir de indicações. Numa fase de investigação e desenvolvimento de um sistema (isto é, ainda em conceção), geralmente opta-se por incluir esta relação no próprio funcionamento do mesmo, de modo a que as futuras indicações possam ser consideradas resultados de medição (correspondendo diretamente a valores medidos da mensuranda e não a valores de qualquer outra grandeza). Após este ajuste do seu funcionamento, o sistema consegue produzir medições de forma independente. Então, é evidente que o segundo passo deixa de ser necessário nas eventuais recalibrações (a não ser que se pretenda realizar outra calibração totalmente de raiz). Por este motivo, o primeiro passo (de natureza comparativa) é frequentemente entendido como sendo, por si só, a calibração [8].

Na literatura surgem inúmeras confusões à volta do conceito de calibrar e outros conceitos semelhantes, sendo expressos frequentemente em contextos errados. É comum o verbo calibrar ser erroneamente utilizado no lugar do verbo ajustar. Um ajuste envolve um conjunto de operações efetuadas a um sistema para que as suas indicações correspondam a valores prescritos da grandeza

a ser medida [8]. Basicamente são efetuadas ações corretivas, alterando aspetos do seu funcionamento, no sentido de adequá-lo a critérios pré-estabelecidos e/ou corrigir deficiências na sua exatidão. A redução do erro de medição, a eliminação do *offset*, o melhoramento da linearidade, a manipulação da sensibilidade, estratégias de anti-*drift* ou anti-histerese, são alguns exemplos de ajustes. Calibrar não envolve qualquer tipo de ajuste. Em vez disso, envolve apenas comparações de valores medidos entre sistemas e o estabelecer de relações que adotam qualquer aspeto de funcionamento. Após uma calibração é que se observa se o sistema está ajustado ou não. E após um ajuste deve-se sempre voltar a calibrar para verificar se os requisitos desejados estão cumpridos. É comum referirem-se a um sistema desajustado como um sistema descalibrado, no sentido de afirmar que este fornece medições com grandes erros e que apresenta fraca exatidão. Mas na verdade, descalibrado é apenas um sistema que produz indicações diferentes de resultados de medição. O conceito de verificação também surge por vezes em contextos errados. Verificar envolve atividades que fornecem evidências objetivas de que um determinado item cumpre os requisitos especificados [8]. Tanto o ajuste como a calibração são operações que no fim podem ser verificadas. Caso se cumpram os requisitos estipulados, então a verificação é validada [8]. A caracterização de um sistema também é um conceito frequentemente mal entendido. Caracterizar envolve o estudo de aspetos do comportamento e performance do sistema, como por exemplo a função de transferência, a linearidade, a histerese, o *drift*, a repetibilidade, o alcance, entre outros. Esta operação é essencial no sentido de se conhecer o comportamento do sistema durante a sua calibração.

Encontram-se na literatura várias definições de *calibração*, mas todas são abrangidas pela definição oficial do VIM. No entanto, alguns exemplos são interessantes para uma melhor compreensão do conceito. No livro *Calibration: A Technician's Guide* [11], a palavra é definida como a “comparação de um equipamento de medição com um instrumento *standard* de maior exatidão para detetar, correlacionar, ajustar, retificar e documentar a exatidão do instrumento a ser comparado”. Neste caso, do ponto de vista de um técnico de calibração de instrumentos, o ajustar e retificar são englobados erroneamente na calibração. Isto é devido a na prática realizarem-se todas estas tarefas de forma sucessiva e indistinta, como uma só operação. É também realçada a natureza comparativa da calibração. No livro *Integrated Smart Sensors* [9] é definida como “o conjunto de operações realizadas por um fabricante de instrumentos de medição de modo a garantir que o equipamento possui uma escala de medição útil”, evidenciando uma fase de conceção do instrumento e referindo-se ao segundo passo de calibração como essencial para se poderem efetuar medições. Ainda no mesmo livro, é também definida de uma forma mais geral como “o processo de relacionar a medição ou o sinal do sensor com o sinal físico de *input* em unidades precisas e bem definidas”, generalizando a operação para qualquer tipo de resposta fornecida pelo sistema (independentemente se é um resultado de medição ou apenas uma indicação). Por fim, no guia de terminologia da Sociedade de Instrumentação da América [12], calibrar é considerado “um teste em que são aplicados ao transdutor valores conhecidos de mensuranda e as leituras de *output* correspondentes são gravadas sob condições específicas”, referindo-se ao primeiro passo como um procedimento fundamentalmente experimental.

2.4 Procedimento Geral de Calibração

O desenvolvimento e escolha de métodos para se executar um procedimento de calibração a um sistema de medição depende de uma variedade de fatores. É necessário considerar aspetos como o tipo de grandeza sob medição, o ambiente em que se insere o sistema, o seu funcionamento e comportamento, as especificações, as capacidades e limitações, entre outros. Não existe um só método de calibração para um determinado sistema, simplesmente há alguns mais adequados e eficazes que outros. É também possível que diferentes tipos de sistema partilhem métodos semelhantes. Apesar desta diversidade, existe uma base concetual, metodológica e procedimental transversal a qualquer calibração, que será abordada nas próximas secções. Antes de prosseguir é fundamental esclarecer o seguinte: entenda-se *calibração* tal e qual como é interpretada na secção 2.3, tendo como base a definição oficial do VIM [8].

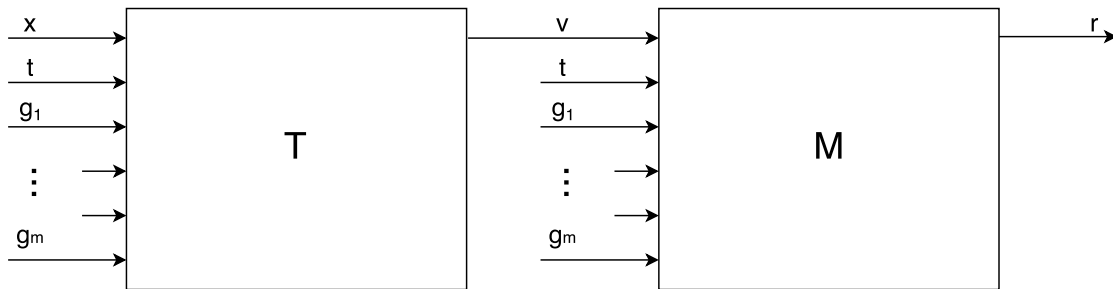


Figura 2.1: Modelo geral da calibração de um sistema de medição.

A calibração de um sistema de medição pode ser entendida de forma concisa através do modelo representado na figura 2.1. Neste estão envolvidos dois elementos (ou submodelos) que relacionam um conjunto de variáveis interdependentes. Compreenda-se a figura com as seguintes descrições dos seus aspetos:

- A variável x representa a mensuranda e assume o valor da sua magnitude. Esta é a grandeza alvo de interesse e destinada a ser medida pelo sistema. Como a mensuranda é o estímulo inicial que desencadeia o processo de medição, também será denominada de variável de entrada (ou *input*) do sistema.
- As variáveis g_k representam grandezas de influência, que são caracterizadas por causarem efeitos indesejáveis no comportamento do sistema e desviarem do normal o seu funcionamento, afetando as indicações produzidas. Podem ser consideradas inúmeras g_k , daí estar presente o índice k para as distinguir ($k \in \mathbb{N}$). A variável t , que representa o tempo, também pode ser inserida neste grupo de grandezas pois é um fator que produz efeitos semelhantes. Tanto g_k como t são *inputs* do modelo, cuja consideração será facultativa.
- A variável v representa a indicação, que é uma grandeza correspondente à resposta (valor de saída, ou *output*) do sistema. O princípio de funcionamento de todos os sistemas de medição implica que a indicação seja sempre causalmente dependente da mensuranda. Deste modo,

informações relativas a x tornam-se disponíveis através de v . Será sempre considerado que ambas as grandezas são de tipos diferentes, representando fenómenos distintos. Logo, v não corresponde a um valor medido de x , sendo apenas a resposta não tratada do sistema.

- A variável r representa o resultado de medição, que, por outras palavras, é o valor medido. Este corresponde a uma estimativa do valor real da mensuranda ($r = \hat{x}$), produzida principalmente a partir de uma indicação fornecida pelo sistema.
- O elemento T representa o sistema de medição como um modelo. Será considerado que este nunca foi calibrado anteriormente e, por este motivo, não pode ser utilizado por si só para efetuar medições, estando ainda numa fase de investigação e desenvolvimento. Portanto, a calibração deste sistema será feita de raiz. O modelo T descreve e/ou explica o comportamento real do sistema, relacionando as indicações com a mensuranda (e quaisquer outras grandezas de influência que se considerem).
- O elemento M representa o oposto de T , descrevendo inversamente o comportamento do mesmo sistema, ou seja, numa ordem hipoteticamente contrária à real. Deste modo, M relaciona os resultados de medição com as indicações (podendo também considerar as outras grandezas presentes em T).

O modelo de calibração da figura 2.1 é uma representação análoga à definição oficial da palavra (secção 2.3 do capítulo anterior). O procedimento geral de calibração divide-se naturalmente em dois passos (ou duas grandes operações) sequenciais, com propósitos direcionados a cada um dos elementos do modelo:

1. O primeiro passo da calibração é fundamentalmente experimental e tem como foco o elemento T do modelo. O procedimento baseia-se em submeter o sistema a testes que permitam observar e analisar o seu comportamento (do ponto de vista externo), com vista a estabelecer relações entre entradas e saídas. Para levar a cabo esta operação, primeiramente é necessário garantir certas condições e requisitos, que são abordados na secção 2.5. O sistema é seguidamente submetido a testes específicos, de natureza experimental, em que são aplicados *inputs* e observados os *outputs* (detalhados na secção 2.6). Os testes permitem extrair dados empíricos, com o objetivo final de caraterizar o comportamento externo.
2. O segundo passo da calibração tem como objetivo tornar o sistema funcional para efeitos de medição, tendo como foco o elemento M do modelo. Considerando todos os dados extraídos anteriormente dos testes e quaisquer informações adicionais relevantes, primeiramente é feita uma modelação matemática do comportamento inverso do sistema, cuja metodologia é descrita na secção 2.7. Seguidamente, o modelo desenvolvido é utilizado para a produção de resultados de medição (secção 2.8).

O sistema é considerado calibrado a partir do momento em que se conseguem realizar medições a partir do modelo, sendo este o objetivo final de toda a operação. Após a calibração, convém

ainda implementar o modelo no próprio funcionamento do sistema, de modo a que este consiga produzir medições de forma independente (ainda na secção 2.8). O modelo inicial da figura 2.1 transforma-se então no da figura 2.2, em que S representa o sistema de medição funcional. A qualidade da operação realizada pode ainda ser verificada com base na análise do erro e incerteza das medições (secção 2.9). A secção final (2.10) resume todo o procedimento e metodologias explicados ao longo do capítulo. Em todas as secções serão maioritariamente exemplificados métodos para sistemas eletrónicos de medição de força ou pressão (dando particularmente ênfase a medidores da pressão plantar e sensores baseados em resistências sensíveis à força).

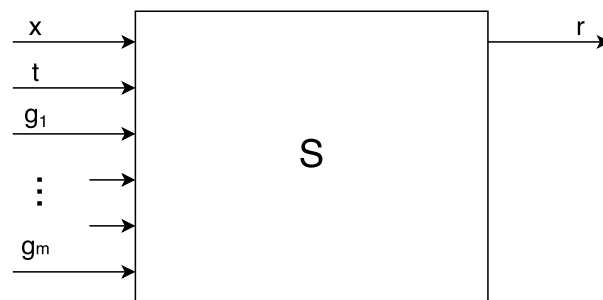


Figura 2.2: Modelo geral de um sistema de medição funcional.

2.5 Condições e Requisitos Prévios

Os testes a que o sistema de medição será submetido no decorrer do primeiro passo de calibração necessitam de certas condições e requisitos para poderem ser executados. O primeiro aspeto essencial é garantir a existência de um ambiente de teste controlável. Este ambiente representa todos os fatores externos ao sistema que o influenciam direta ou indiretamente durante os testes. É imprescindível controlar pelo menos o seguinte fator: a própria grandeza destinada a ser medida. Em condições normais de medição, o sistema fica à mercê das alterações naturais da mensuranda. Mas durante os testes de calibração é absolutamente necessário controlar fisicamente a mensuranda, ou seja, dominar os *inputs* que o sistema recebe. Isto implica a capacidade de aumentar, diminuir ou manter constante a magnitude da grandeza, durante qualquer período de tempo desejado. Outros parâmetros do ambiente que podem ser controlados são aqueles que influenciam indiretamente o comportamento do sistema, isto é, produzem efeitos não desejáveis que desviam do ideal o seu funcionamento. Medições destas grandezas de influência a partir de outros sistemas poderão ser úteis mais à frente no processo de calibração.

O segundo aspeto essencial é a capacidade de medição da mensuranda através de meios independentes do sistema sob calibração. Possuir controlo sobre esta grandeza não é fator suficiente, sendo também necessário definir e estabelecer valores pretendidos para a mesma. Portanto, é imprescindível conhecer os valores numéricos da mensuranda que são aplicados ao sistema durante os testes (*inputs*). Para tal, recorre-se normalmente a um sistema de medição externo que meça a mesma grandeza. Este deve estar previamente ajustado, calibrado e possuir especificações

conhecidas (principalmente exatidão e incerteza), garantindo assim medições fiáveis e rastreabilidade metrológica, preferencialmente segundo padrões internacionais de qualidade. As medições realizadas por este sistema serão aceites como os verdadeiros valores da mensuranda, a base de comparação. Estas medições efetuadas durante os testes representam um conhecimento antecipado da mesma. Naturalmente que no fim do processo de calibração, o sistema fará as medições da grandeza por ele próprio num ambiente não controlado.

Por fim, o último aspeto a considerar é o método de gravação dos *inputs* aplicados ao sistema, bem como dos *outputs* correspondentes (indicações). Estas informações são obviamente necessárias no decorrer da calibração, pelo que convém serem acedidas e registadas. O processo pode ser executado manualmente, em que o operador anota as medições fornecidas pelos sistemas. Estes podem também possuir elementos de memória, guardando automaticamente os valores lidos. Se o tempo for um fator importante para os testes, é essencial haver sincronização entre as leituras de ambos os sistemas.

J. A. Flórez e A. Velásquez [13] recorreram a dois métodos distintos para controlar a mensuranda e saber antecipadamente o seu valor, na calibração de um sensor de pressão de contacto (baseado em resistências sensíveis à força). O primeiro método consistia em colocar estaticamente pesos calibrados sobre a área do sensor, exercendo assim pressões conhecidas. É denominado de método do peso morto, sendo um dos mais simples e utilizado por vários investigadores em sistemas de medição semelhantes [14, 15]. O segundo método utilizava um mecanismo em parafuso acionado por um motor elétrico, que lhe aplicava um binário e movia-o verticalmente. O sensor era colocado sob a ponta inferior do parafuso, que exercia forças compressivas e dinâmicas ao deslocar-se para baixo. A pressão aplicada era conhecida através de uma célula de carga posicionada debaixo do sensor. Um computador com o programa LabView® encarregava-se de controlar o mecanismo e guardar os valores de pressão. Outros autores utilizaram máquinas de teste mais robustas com princípios de funcionamento semelhantes [16–18]. Estes métodos referidos baseiam-se na suposição que a distribuição de pressão é aplicada uniformemente na área sensível do sistema ou que este responde de maneira consistente em todos os pontos desta superfície. É preciso garantir estes aspetos para controlar e conhecer corretamente a pressão aplicada.

O procedimento de calibração do paroTec™, sistema de medição da distribuição de pressão na superfície do pé, foi estudado por M. Zequera *et al.* [19]. Para controlarem a pressão exercida no sensor, recorreram a uma prensa acionada por ar comprimido. Esta era constituída por duas placas metálicas maciças, colocadas paralelamente e com um espaçamento entre elas. De modo a impedir que deslizassem estavam aparafusadas ao longo do seu perímetro. Entre as placas encontrava-se uma membrana de borracha, que podia ser insuflada com ar comprimido através de 28 tubos (para distribuir a pressão uniformemente). O sensor em forma de palmilha era colocado sob a membrana. Partia-se então do princípio que a pressão do ar no interior da borracha correspondia à pressão de contacto exercida no sensor. Para variarem a pressão recorreram a uma válvula proporcional reguladora, controlada eletricamente. O valor da pressão era registado através de um sensor de pressão pneumática previamente calibrado. Outra prensa de calibração com um funcionamento semelhante é o equipamento trublu® (figura 2.3), utilizado pela Novel, fabricante



Figura 2.3: Equipamento trublu[®] (Novel). Prensa acionada a ar comprimido, para calibração de palmilhas medidoras de pressão.

de sistemas de medição de pressão plantar.

Os métodos do tubo de choque e da queda de peso são utilizados para aplicar variações muito rápidas de pressão, provocando impulsos no *input* dos sistemas [20]. O primeiro método envolve um tubo cuja diferença de pressão entre as extremidades é bastante elevada. Esta diferença é mantida devido à existência de um diafragma a separá-las. O sensor é colocado na ponta de menor pressão. Na outra ponta, a pressão é aumentada aos poucos até o diafragma romper. Nesse momento, as pressões equalizam-se rapidamente, sujeitando o sensor a um choque de pressão. É possível calcular a pressão exercida baseado-se em modelos matemáticos, no entanto existem diversos fatores que desviam o processo do comportamento ideal [20]. O segundo método envolve a queda livre de um peso sobre o sensor de pressão. Este cai ao longo de uma guia até embater num pistão, que por sua vez comprime uma câmara (ou cilindro) cheia de fluido. O sensor é posicionado sob esta câmara, sendo assim submetido a um aumento imediato de pressão. Conhecendo o valor da massa, a altura da queda, a desaceleração sofrida no impacto e as geometrias do pistão e do cilindro, é possível calcular a amplitude do impulso de pressão [21]. A vantagem destes métodos referidos é aplicarem pressão dinamicamente, com formas de onda em impulso ou degrau. Apesar disto, o cálculo da pressão exercida é complexo e pode introduzir bastante erro no valor.

As abordagens de controlo da mensuranda até aqui referidas possuem todas um inconveniente: a necessidade de se deslocar o elemento sensível do sistema para fora do seu local de operação, introduzindo-o noutra ambiente. No entanto, em alguns sistemas é possível exercer controlo *in situ*. Uma das soluções é integrar no sistema um atuador, produzindo *inputs* físicos conhecidos diretamente no sensor. Este atuador deve ser confiável (o mais exato possível e à prova de falhas) e funcionar no ambiente normal do sensor. G. Horn *et al.* [9] exploraram este método, referindo sensores inteligentes que conseguiam realizar automaticamente testes, calibrações e ajustes *in situ*. Baseados neste conceito, P. Yameogo *et al.* [22] calibraram um cateter medidor da pressão intracraniana, composto por um sensor piezoresistivo implementado numa membrana de silicone. Junto ao sensor integraram um atuador eletrostático, que produzia tensões entre os seus elétrodos,

resultando na deflexão da membrana. Este deslocamento podia ser convertido numa específica pressão de referência, simplesmente controlando a tensão aplicada. Outro método de controlo da mensuranda e eventual calibração *in situ* é abordado por S. Urry [23], especificamente para sistemas de medição de pressão plantar. É referido que se pode aplicar um valor conhecido de pressão com base no peso corporal de um sujeito de teste. O seu peso deve ser medido previamente a partir de uma balança calibrada. Ao apoiar-se totalmente sobre a área do sensor, é então possível calcular a pressão exercida. Os fabricantes do F-scan™ recomendam esta técnica, apesar de causar erros máximos de 14% [23].

2.6 Testes Experimentais

Nesta fase inicial da calibração, o sistema de medição é submetido a testes experimentais. Para os executar é necessário ter reunidas as condições e requisitos previamente referidos: controlo sobre a mensuranda e conhecimento antecipado do seu valor, e meio de gravação dos valores produzidos. Os testes têm como objetivo observar, analisar e extrair informações acerca do comportamento estático e/ou dinâmico do sistema (do ponto de vista externo). O processo baseia-se em submetê-lo a um conjunto de valores de mensuranda conhecidos $[x_1, \dots, x_n]$ e registar os correspondentes valores das indicações produzidas $[v_1, \dots, v_n]$. A variável n corresponde ao número de pontos de calibração, pelo que a cada ponto i está sempre associado um único valor de mensuranda x_i . Existe sempre uma relação direta $v_i[x_i]$ e a sua inversa $x_i[v_i]$. De um modo geral, o resultado em bruto de um teste pode ser representado pelo conjunto dos pares ordenados $[input, output]$, organizados numa matriz ou tabela:

$$\begin{bmatrix} x_1 & v_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & v_n \end{bmatrix}$$

Para se visualizar melhor o resultado é comum apresentarem-se gráficos de dispersão das relações direta e inversa. Em conjunto com os valores produzidos devem também ser especificadas outras informações que se considerem relevantes, como por exemplo o tipo de calibração utilizada e os parâmetros relacionados. A extração de dados dos resultados dos testes baseia-se sempre no estudo de v em função de todas as outras variáveis ou fatores que se considerem. Podem ser dados quantitativos e/ou qualitativos.

O método de se aplicar valores de mensuranda ao sistema pode ser executado de duas formas gerais, dividindo a calibração em dois tipos: estática e dinâmica. A calibração estática envolve a interação do sistema com diferentes valores fixos de mensuranda. Isto significa que cada x_i aplicado permanece constante e estável ao longo de um certo período de tempo Δt estipulado para o teste. O registo das indicações produzidas pode ser efetuado num único instante ${}_1t$, em vários instantes distintos ${}_jt$ ($j \in \mathbb{N}$), ou então continuamente ao longo do tempo t . No primeiro caso, para cada x_i existe apenas um v_i . No segundo caso, a cada x_i fica associada uma função discreta

$v_i[jt]$. No terceiro caso, existe uma função contínua $v_i(t)$ associada a cada x_i . Para todos os casos, qualquer instante de tempo registado tem de estar dentro do período Δt . Neste tipo de calibração é essencial ponderar e definir apropriadamente fatores como o número de pontos n , os valores de cada patamar x_i , o período Δt e os instantes $j t$. O tempo decorrido entre a aplicação de x_i e x_{i+1} é um fator irrelevante. A partir de um teste deste tipo é possível extrair informações acerca do comportamento estático do sistema, incluindo especificações como o *drift*.

A calibração dinâmica envolve a interação do sistema com valores de mensuranda variáveis. Isto significa que o x aplicado varia continuamente ao longo do tempo t , ou seja, $x(t)$ (durante um certo período Δt estipulado). O registo dos valores de mensuranda deve ser efetuado sincronizadamente com as respetivas indicações produzidas. Se for um registo contínuo (em todos os instantes), então o teste resulta numa função $v(t)$ associada a $x(t)$. Neste caso, o índice i desaparece pois os pontos de calibração perdem o seu significado. Estes só surgem quando se efetua um registo discreto (apenas em determinados instantes), que na prática é o mais provável de ser executado. Nesta situação, a cada instante t_i ficam associados simultaneamente x_i e v_i , pelo que $x_i[t_i]$ e $v_i[t_i]$. A forma como a mensuranda varia é o fator principal que caracteriza este tipo de calibração. Deve-se adequar este fator de modo a ir de encontro aos objetivos do teste, ou seja, permitir a obtenção das informações desejadas acerca do comportamento dinâmico do sistema. Por vezes pretende-se um teste representativo de eventuais condições em que o sistema calibrado funcionará, outras vezes apenas determinar especificações como histerese ou linearidade. Adequar o fator referido traduz-se na escolha da função $x(t)$, que pode ser linear (crescente ou decrescente), exponencial, sinusoidal (simples ou modulada), impulso (que engloba todas as frequências possíveis), e qualquer outro tipo. Outros fatores a considerar incluem a frequência de registo dos pontos i (relacionada com o n) e o período Δt .

Os testes estáticos e dinâmicos introduzem em certos casos a variável tempo aos resultados. Mas ambos podem ser elaborados de tal modo que considerem também outras variáveis para além do x , v ou t . As variáveis a ter em conta devem afetar as indicações produzidas, podendo representar grandezas de influência presentes no ambiente, várias repetições do mesmo teste, direção de variação da mensuranda, entre outras. Logo, para além do v ser sempre função do x e em certos casos do t , é também provável ser dependente de um conjunto de m variáveis $[g_1, \dots, g_m]$, pelo que $v(x, t, g_1, \dots, g_m)$. Uma variável g_k pode tomar valores discretos ou contínuos, dependendo daquilo que representa (por exemplo, g_k é discreta se representar amostras estatísticas de v_i). No decorrer de um teste deve-se sempre alterar uma das variáveis e manter constantes todas as outras (por exemplo, num teste dinâmico manter constante g_k e variar x , num teste estático manter constante x e variar g_k). Os testes podem ser repetidos para se experimentarem diferentes valores nas variáveis que permanecem constantes. A introdução de g_k permite extrair mais informações acerca do comportamento do sistema e eventualmente calibrá-lo melhor, mas implica o aumento da dimensão dos resultados dos testes. Por vezes reduz-se a dimensão condensando $v(g_k)$ num único valor representativo de toda a função, dispensando assim g_k (por exemplo, num teste estático calcular a média aritmética \bar{v}_i para todos os j de $v_i[jt]$ e dispensar $j t$ do resultado).

N. Rana [17] executou testes experimentais para calibrar um sensor baseado em resistências

sensíveis à força. O procedimento consistia em aplicar força (ou pressão) de forma dinâmica. Para tal, variou linearmente a força aplicada até um máximo de 100 N (Newton), registrando de 10 N em 10 N a resistência produzida pelo sensor. A partir do gráfico resultante observou-se que o sensor não tinha comportamento linear. Depois de ajustar este fator, o sensor passou a responder linearmente até um certo limiar de força. Então executou um novo teste para o calibrar, que bastou ser do tipo estático e ter apenas dois pontos de calibração, a $1/3$ e $2/3$ do limiar. A Tekscan também recomenda a calibração dos seus sensores I-Scan™, de mapeamento de pressão tátil, com apenas dois pontos localizados a 20% e 80% da pressão máxima esperada, procedimento detalhado por L. Macintyre [24]. A escolha do valor de mensuranda para cada ponto deve ser feita de acordo a revelar o melhor possível a verdadeira resposta do sistema. Os valores devem estar sempre no intervalo de interesse, aquele que se espera durante o funcionamento do sistema calibrado. O número total de pontos também é um fator importante a considerar, uma vez que poucos pontos podem não revelar corretamente tal resposta, mas demasiados pontos tornam o processo lento (principalmente em calibração estática). Este aspecto está relacionado com a taxa de aquisição dos sinais. Rick S. Hall *et al.* [16] utilizaram um sensor semelhante a N. Rana [17] e também aplicaram forças dinamicamente, mas registraram os pontos a uma taxa de 100 Hz para terem uma melhor resolução temporal. Outros autores como M. Zequera *et al.* [19], em testes com o medidor de pressão plantar paroTec™, tiveram em consideração condições reais de utilização do sistema para definirem a taxa de aquisição (por exemplo, a velocidade de marcha).

J. Flórez e A. Vélasquez [13] realizaram testes estáticos e dinâmicos com um sensor semelhante ao utilizado por Rick S. Hall *et al.* [16], para medição de pressão. No teste estático, aplicaram vários patamares de pressão e registraram o sinal de resposta (em tensão) durante alguns segundos. Verificaram a existência de *drift* no *output*. Por este motivo, consideraram a média aritmética dos sinais como valor representativo das respostas, traçando assim um gráfico de dispersão da tensão média em função da pressão. No teste dinâmico, aplicaram um ciclo de compressão seguido de descompressão, registrando em cada ponto de pressão duas tensões (para cada uma das direções de variação da mensuranda: ascendente e descendente). Este método revelou a existência de histerese na resposta do sensor. Eventualmente implementaram metodologias de compensação de *drift* e histerese.

B. Saggin *et al.* [15] executaram vários testes com o sistema de medição de pressão plantar pedar®, de modo a avaliarem certas especificações. Nos testes estáticos consideraram variáveis que sabiam que tinham influência nos sensores, como: área sensível à pressão, sensibilidades cruzadas entre sensores, dependência da temperatura, efeito da pressão nas bordas dos sensores, influência da curvatura da superfície que aplicava pressão, entre outras. Nos testes dinâmicos observaram a resposta em frequência dos sensores, aplicando pressão com forma de onda sinusoidal, entre 2 N e 60 N, fazendo um varrimento da gama de frequências 1-50 Hz. Estas informações eram úteis para prever situações reais de utilização, como a cadência dos passos dados com o sensor dentro do calçado.

2.7 Modelação do Comportamento do Sistema

2.7.1 Generalização do Modelo

Os testes realizados com o sistema de medição permitiram observar e analisar minuciosamente como as indicações produzidas eram afetadas pela mensuranda e por outras grandezas de influência (incluindo o tempo). As informações obtidas demonstravam sobretudo relações, dependências, tendências e especificações, aspetos que em conjunto caracterizam o comportamento externo do sistema de medição. Os dados extraídos dos testes, no entanto, não permitem caracterizar o comportamento interno, isto é, explicar o funcionamento. Esta caracterização só pode ser obtida conhecendo a constituição do sistema, o funcionamento dos seus elementos internos e as interações entre si. Informações desta natureza terão de provir de outras fontes. Mas independentemente de existir ou não este conhecimento teórico, qualquer sistema pode ser calibrado apenas com o conhecimento empírico dos testes experimentais.

Agora nesta fase pretende-se desenvolver um modelo do sistema, que deverá descrever e/ou explicar aproximadamente o seu comportamento real, considerando todas as informações que se possuírem acerca do mesmo. Devido à natureza dos dados ser maioritariamente quantitativa e também por motivos práticos de desenvolvimento e implementação, um modelo matemático é geralmente a opção ideal (podendo ser determinístico ou estocástico). Considere-se que o modelo relaciona as variáveis de entrada x, t, g_k ($k = 1, \dots, m$) com a variável de saída \hat{v} , podendo ser formalizado do seguinte modo:

$$\hat{v} = T(x, t, g_1, \dots, g_m) \quad (2.1)$$

A variável \hat{v} representa uma estimativa da indicação, uma vez que é produzida pelo modelo e não pelo sistema em si. A relação T pode representar tabelas de valores, funções, fórmulas, ou englobar estruturas matemáticas mais complexas. É comum ser simplesmente denominada de função de transdução ou de observação [10]. Em sistemas lineares e invariantes no tempo normalmente associa-se o nome de função de transferência [25]. Visualizada num gráfico, denomina-se geralmente de curva de calibração. O modelo 2.1 reflete o comportamento direto do sistema, isto é, na direção de eventos que se inicia na mensuranda e termina na indicação. É também fundamental inferir o comportamento inverso do sistema, ou seja, na direção da indicação para a mensuranda (apesar de na realidade não funcionar causalmente deste modo). Considere-se então o seguinte modelo inverso que relaciona as variáveis de entrada v, t, g_k ($k = 1, \dots, m$) com a variável de saída \hat{x} :

$$\hat{x} = M(v, t, g_1, \dots, g_m) \quad (2.2)$$

Apesar dos modelos 2.1 e 2.2 representarem o inverso um do outro, as relações M e T não são necessariamente inversas, devido às variáveis t e g_k ($\forall k$) permanecerem como entradas e apenas v e x comutarem de posição. Só se verificam relações inversas quando simplesmente $\hat{v} = T(x)$, resultando em $\hat{x} = T^{-1}(v) = M(v)$. Note-se que a saída \hat{x} é novamente uma estimativa, neste caso do valor real da mensuranda. O modelo 2.2 é denominado de modelo de medição [8, 10], uma vez

que a partir dele são obtidos resultados de medição r (sendo $r = \hat{x}$). Seguindo a mesma lógica, normalmente denomina-se M como a função de medição [8, 10]. Este modelo caracteriza-se por reconstruir a informação sobre a mensuranda que se tornou disponível através da indicação, devido ao princípio de funcionamento do sistema.

No fim da calibração pretende-se que o sistema fique apto para efetuar medições, ou seja, produzir resultados de medição a partir das suas indicações. Logo, o objetivo final desta fase é fundamentalmente desenvolver o modelo 2.2, com vista a eventualmente implementá-lo e ser adotado pelo sistema (secção 2.8). É possível enveredar por dois caminhos distintos de procedimento: (i) desenvolver primeiramente o modelo de transdução (2.1) e determinar quaisquer parâmetros associados, para depois invertê-lo e encontrar o modelo de medição (2.2); (ii) ignorar o modelo de transdução e desenvolver diretamente o modelo de medição e determinar os parâmetros associados. Em teoria, o caminho (i) é o mais logicamente correto: primeiro modelar o comportamento direto e ser o mais fiel possível à realidade, e depois, a partir deste, deduzir e supor o comportamento inverso que é impossível de ocorrer na realidade. Este é o procedimento formal e teórico que a literatura sobre calibração geralmente aborda. Mas na prática pode não fazer sentido modelar dois comportamentos quando normalmente só se vai utilizar o segundo. Daí surge o caminho (ii), modelando à partida o comportamento inverso, à custa de uma maior abstração da realidade e certa perda de exatidão e coerência. A escolha de um dos caminhos depende dos objetivos estabelecidos e do tipo de informações que se possuem acerca do sistema. O caminho (i) deve ser escolhido perante as seguintes situações: (1) quando se possuem dados sobre o funcionamento interno do sistema (até certo nível), sendo ideal modelar a ordem causal de acontecimentos na cadeia de medição. O método resulta num modelo explicativo da transdução (do tipo “*white-box*”), refletindo melhor a realidade. O eventual modelo invertido é mais exato e coerente; (2) quando se possuem apenas conhecimentos empíricos provenientes dos testes, mas pretende-se particularmente obter um modelo de transdução descritivo (do tipo “*black-box*”) para quaisquer outros fins; (3) quando se conhece antecipadamente o modelo de transdução, bastando invertê-lo. O grande obstáculo de (i) é a acrescida complexidade, particularmente pela necessidade de inversão do modelo de transdução para encontrar o de medição. Por vezes pode não ser possível executar tal tarefa e só se consegue modelar o primeiro. Apesar da calibração ser na mesma exequível nesta situação, isto repercute-se mais adiante, aumentando a complexidade do cálculo dos resultados de medição e diminuindo a sua exatidão. A escolha do caminho (ii) é geralmente a opção ideal e seguida pela maior parte dos investigadores. É provável que o modelo de medição apresente menor exatidão, mas o desenvolvimento, implementação e utilização tornam-se bastante mais simples.

A meta final desta fase de calibração é estabelecer M e determinar os seus parâmetros associados, a partir dos dados obtidos. No desenvolvimento de M deve-se sempre balançar a sua complexidade (em prol de um modelo mais exato e fiel ao sistema real) e a exequibilidade da sua implementação (a favor de um processo mais rápido e simples). Para além disto, o comportamento deve ser sempre modelado apenas dentro do intervalo de indicações que se espera encontrar durante o funcionamento do sistema calibrado. Nas próximas subsecções (da 2.7.2 até à 2.7.7) serão abordados alguns dos métodos mais utilizados no desenvolvimento de modelos matemáticos do

comportamento de sistemas de medição.

2.7.2 Modelos Lineares

O comportamento que idealmente se espera encontrar nos sistemas é o linear, devido a ser o mais simples de se modelar numa calibração. Num modelo linear simples são consideradas as seguintes suposições: (i) qualquer grandeza de influência g_k é negligenciável e não afeta o sistema; (ii) a mensuranda estimada \hat{x} depende apenas da indicação produzida v , ou seja, o modelo é do tipo $\hat{x} = M(v)$; (iii) a relação M é linear. Ao assumir estes três aspetos é possível generalizar o comportamento inverso do sistema na seguinte equação linear:

$$\hat{x} = c_0 + c_1 v \quad (2.3)$$

Os parâmetros c_0 e c_1 deste polinómio de 1º grau são encontrados a partir dos pontos de calibração obtidos anteriormente nos testes experimentais. Para definir uma reta são necessários pelo menos 2 pontos de interpolação. Considerando que se conhecem $[x_1, v_1]$ e $[x_2, v_2]$, então:

$$c_0 = x_1 - c_1 v_1 \quad (2.4)$$

$$c_1 = \frac{x_2 - x_1}{v_2 - v_1} \quad (2.5)$$

O parâmetro c_0 representa o *offset* da resposta e c_1 corresponde à sensibilidade (ou ganho) do sistema. A equação pode tornar-se ainda mais simples se um dos pontos equivaler a $v_1 = 0$ e $x_1 = 0$. Neste caso em que a reta cruza a origem não há *offset*, pelo que $c_0 = 0$ e $c_1 = x_2/v_2$.

A escolha de dois pontos de calibração para encontrar $M(v)$ pode não ser suficiente para representar corretamente um comportamento linear. Devido às medições estarem afetadas por erros aleatórios, o gráfico de dispersão de $x_i[v_i]$ apresenta frequentemente uma nuvem de pontos, que apenas evidencia uma tendência linear. Produzir uma reta só com dois destes pontos não reflete esta tendência e resulta em incertezas muito elevadas quando v se afasta das vizinhanças de v_1 e v_2 . O ideal é recorrer a um modelo de regressão linear considerando n pontos medidos $[x_i, v_i]$ ($i = 1, \dots, n$). O método mais utilizado é o dos mínimos quadrados [26], que tem como objetivo determinar os parâmetros c_0 e c_1 que melhor ajustam a reta 2.3 aos pontos de calibração. O método resulta nas seguintes expressões:

$$c_0 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i - c_1 \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (2.6)$$

$$c_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n v_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n v_i}{n \sum_{i=1}^n v_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n v_i \right)^2} \quad (2.7)$$

Pode-se também forçar a reta a cruzar a origem, ou seja, $\hat{x} = c_1 v$. Neste caso dispensa-se c_0 e o cálculo de c_1 torna-se mais simples:

$$c_1 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i x_i}{\sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (2.8)$$

Qualquer reta obtida a partir deste método garante uma melhor exatidão na estimativa de x , devido a ser a que minimiza o erro quadrático total. No entanto, este modelo pode por vezes ser uma aproximação grosseira do comportamento real e só ser adequado em intervalos de indicações muito restritos em que se possa assumir linearidade.

Os modelos lineares com dois pontos de interpolação apenas são eficazes em situações quase ideais, nas quais os sistemas apresentam forte linearidade (como por exemplo o medidor de pressão piezoresistivo de P. Yameogo *et al.* [22]). Os investigadores geralmente recorrem ao método dos mínimos quadrados para regressão linear, revelando ser bastante robusto. Por exemplo, Z. Xuefeng *et al.* [27], no desenvolvimento de um sensor de pressão plantar baseado em sistemas micro-eletromecânicos, calibraram-no segundo este método, com 11 pontos experimentais obtidos de forma estática. Este tipo de modelo introduzia pequenos erros aceitáveis nas medições, devido à não-linearidade do sensor, mas foi na mesma utilizado por causa da sua simplicidade e produção de aproximações satisfatórias. H. Cetin *et al.* [28] recorreram ao mesmo método para calibração de um sistema de medição de tensão. Produziram duas retas de regressão, para pontos obtidos de forma estática e dinâmica (variação linear). As retas apresentavam pequenas diferenças nos seus coeficientes, concluindo-se que diferentes procedimentos de calibração levavam a resultados de medição distintos, apesar de utilizarem o mesmo tipo de modelo. Outros autores como K. Guo *et al.* [29] e K. Sekiguchi *et al.* [30] também utilizaram regressões lineares na calibração de sensores de força/binário com 6 graus de liberdade. Devido à existência de 6 mensurandas, as regressões foram calculadas em formato matricial, resultando em matrizes de parâmetros de ajuste.

2.7.3 Modelos Polinomiais

Poucos sistemas apresentam comportamento verdadeiramente linear, sendo necessário recorrer a outras funções para o modelar, como por exemplo um polinómio. Enquanto que o modelo linear corresponde a um polinómio de grau 1, o modelo polinomial é uma generalização para graus superiores. Considerando novamente um modelo do tipo $\hat{x} = M(v)$, a função assume agora a forma de um polinómio de grau d :

$$\hat{x} = c_0 + c_1 v + c_2 v^2 + \dots + c_d v^d \quad (2.9)$$

Para se determinarem os coeficientes c_j ($j = 0, \dots, d$) normalmente efetua-se uma interpolação com n pontos de calibração $[x_i, v_i]$ ($i = 1, \dots, n$). Um polinómio de grau d necessita de $n = d + 1$ pontos para que todos os c_j fiquem definidos. Substituindo as variáveis \hat{x} e v pelos valores $[x_i, v_i]$ conhecidos, forma-se então um sistema de n equações lineares com n incógnitas (os

coeficientes), que pode ser formalizado na seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_1)^0 & (v_1)^1 & \dots & (v_1)^d \\ (v_2)^0 & (v_2)^1 & \dots & (v_2)^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (v_n)^0 & (v_n)^1 & \dots & (v_n)^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_d \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{X} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{C} \quad (2.10)$$

Os valores das incógnitas \mathbf{C} podem ser encontrados resolvendo diretamente a equação $\mathbf{C} = \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{X}$ [26]. Um método mais simples de resolução é por determinantes [26]. Primeiro calcula-se o determinante $\Delta = |\mathbf{V}|$, que deve ser obrigatoriamente diferente de zero ($\Delta \neq 0$). Depois calcula-se Δ_{c_j} , que é o determinante de uma matriz semelhante a \mathbf{V} , com a diferença de que a sua coluna j fora substituída pelo vetor \mathbf{X} . Os coeficientes são dados pela seguinte divisão:

$$c_j = \frac{\Delta_{c_j}}{\Delta} \quad (2.11)$$

Este método é facilmente aplicado para determinar os coeficientes de polinómios quadráticos ou cúbicos. No entanto, quando o grau é mais elevado (utilizando-se mais pontos de interpolação), o processo torna-se muito mais trabalhoso e moroso. Nestes casos é melhor recorrer a outras formas de resolução de sistemas lineares, como por exemplo o método numérico iterativo de Gauss-Seidel [26], ou então optar inicialmente por métodos mais simples e eficazes de interpolação, como o polinómio interpolador de Lagrange [26].

A interpolação é uma estratégia eficaz para um número reduzido de pontos de calibração. No entanto, na maior parte das vezes existe um grande número de pontos que em conjunto evidenciam uma tendência. Esta tendência é melhor refletida num polinómio obtido por regressão e não por interpolação. Para além disto, a interpolação força $M(v)$ a atravessar todos os pontos. Isto faz com que certos pontos selecionados numa ponta da curva tenham forte influência em zonas remotas, provocando oscilações desnecessárias no polinómio. O método dos mínimos quadrados pode ser generalizado para regressão polinomial [26]. Considere-se que a equação 2.9 é reformulada em termos de uma combinação linear de polinómios $P_j(v)$ ortogonais (cada um com grau j):

$$\hat{x} = p_d(v) = \sum_{j=0}^d c_j P_j(v) \quad (2.12)$$

O polinómio $p_d(v)$ pode assumir qualquer grau d pretendido entre 1 e $n - 1$. Com os n pontos $[x_i, v_i]$ ($n > d$) calculam-se os $P_j(v)$ de modo a serem ortogonais entre si, através da seguinte relação de recorrência:

$$P_{(j+1)}(v) = A_j(v - B_j)P_j(v) - D_jP_{j-1}(v), \quad j = 0, 1, \dots, d \quad (2.13)$$

$$A_j = 1, \quad \forall j \quad (2.14)$$

$$B_j = \frac{\sum_{i=1}^n v_i P_j(v_i) P_j(v_i)}{\sum_{i=1}^n P_j(v_i) P_j(v_i)}, \forall j \quad (2.15)$$

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_j(v_i) P_j(v_i)}{\sum_{i=1}^n P_{j-1}(v_i) P_{j-1}(v_i)}, j > 0 \quad (2.16)$$

Em que $P_0(v) = 1$, $P_{-1}(v) = 0$ e $D_0 = 0$. Por fim, os coeficientes c_j são simplesmente dados pela seguinte igualdade:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i P_j(v_i)}{\sum_{i=1}^n [P_j(v_i)]^2} \quad (2.17)$$

O polinómio de regressão resultante pode então ser reformulado novamente no formato da equação 2.9. Convém sempre manter o grau do polinómio o mais reduzido possível para o seu desenvolvimento não se tornar demasiado complexo (por exemplo, se pode ser atingida uma exatidão aceitável com um polinómio de grau 2, então não se deve usar um de grau 3) [25].

2.7.4 Modelos de Funções Generalizadas

O comportamento inverso do sistema pode ser complexo demais para ser descrito por um simples polinómio. O melhor é então construir a função ideal que se assuma encaixar nas observações efetuadas. Esta pode possuir qualquer formato desejado e ser constituída por várias funções de diferentes tipos (racionais, exponenciais, logarítmicas, trigonométricas, etc ...), tendo associado um conjunto de parâmetros para ser possível deformá-la e ajustá-la aos dados experimentais. Considere-se um modelo de medição com uma função generalizada M que depende da variável v e de um conjunto de parâmetros de ajuste $[c_1, \dots, c_m]$ para produzir \hat{x} :

$$\hat{x} = M(v, c_1, \dots, c_m) \quad (2.18)$$

O objetivo é então determinar os c_j desconhecidos ($j = 1, \dots, m$), transformando-os em constantes em vez de variáveis. Assim elimina-se a necessidade de M depender destes, obtendo-se um modelo do tipo $\hat{x} = M(v)$. Funções $M(v, c_1, \dots, c_m)$ geralmente utilizadas incluem exponenciais, logarítmicas, raízes e potências. Por exemplo, na calibração do I-scan (Tekscan³), sistema de mapeamento da pressão de contacto, os fabricantes aconselham a utilização de uma função de potência com dois parâmetros [24], do tipo:

$$\hat{x} = c_1 v^{c_2} \quad (2.19)$$

³<https://www.tekscan.com/>

Outros tipos de sistema poderão necessitar de funções mais complexas, como a função desenvolvida por J. Steinhart *et al.* [31] para a calibração de termístores medidores de temperatura:

$$\hat{x}^{-1} = c_1 + c_2 \log(v) + c_3 [\log(v)]^3 \quad (2.20)$$

Esta revelava ser a que perfeitamente se adaptava à grande maioria destes transdutores e adequada para qualquer gama de temperaturas, encaixando-se melhor do que qualquer outra função nos dados experimentais. Outros formatos geralmente utilizados são por exemplo os seguintes:

$$\hat{x} = c_1 e^{c_2 v} \quad (2.21)$$

$$\hat{x} = c_1 + c_2 \ln(v) \quad (2.22)$$

$$\hat{x} = c_1 \sqrt[d]{v} \quad (2.23)$$

Quando as funções desenvolvidas se tornam demasiado complexas, poderá ser mais eficaz aproximá-las a outras mais simples. Qualquer função $f(v)$ contínua e diferenciável até à sua d -ésima derivada pode ser aproximada por um polinómio de Taylor de grau d

$$f(v) \approx f(a) + f'(a)(v-a) + \frac{f''(a)}{2!}(v-a)^2 + \dots + \frac{f^{[d]}(a)}{d!}(v-a)^d \quad (2.24)$$

em que $f^{[d]}(a)$ corresponde à d -ésima derivada de f calculada no ponto a . Apenas se obtêm boas aproximações na vizinhança de a , valor que deve escolhido adequadamente ao intervalo de indicações esperado. Por exemplo, uma função do tipo $f(v, c_1, c_2) = c_1 e^{c_2 v}$ pode ser satisfatoriamente aproximada em torno de $a = 0$ com um polinómio cúbico [25]:

$$c_1 e^{c_2 v} \approx c_1 \left(1 + c_2 v + \frac{c_2^2}{2!} v^2 + \frac{c_2^3}{3!} v^3 \right) \quad (2.25)$$

Como o resultado destas aproximações são polinómios, a determinação dos parâmetros associados fica mais simples e pode ser feita segundo os métodos referidos na subsecção anterior 2.7.3.

No caso de não se optar por aproximações de funções e utilizarem-se as mesmas tais como são, a interpolação é novamente a abordagem mais direta para se determinarem os seus parâmetros. São necessários tantos pontos de calibração quantos os parâmetros existentes ($n = m$). Com os pontos $[x_i, v_i]$ ($i = 1, \dots, m$) produz-se o seguinte sistema de m equações não lineares com m incógnitas:

$$\begin{cases} x_1 = M(v_1, c_1, \dots, c_m) \\ x_2 = M(v_2, c_1, \dots, c_m) \\ \vdots \\ x_m = M(v_m, c_1, \dots, c_m) \end{cases} \quad (2.26)$$

Resolver este sistema significa encontrar as incógnitas c_j . Métodos analíticos de resolução podem solucioná-lo, mas normalmente não são exequíveis devido à complexidade das equações. Em casos muito específicos existem, no entanto, formas de simplificá-las algebricamente, como por exemplo calcular o logaritmo de ambos os membros das equações de modo a linearizar funções exponenciais. Contudo, geralmente é necessário recorrer a métodos numéricos de resolução de sistemas de equações não lineares. O método de Newton [26] é largamente utilizado para o efeito e será então descrito. Considere-se que as equações do sistema são reescritas na forma

$$x_i - M(v_i, c_1, \dots, c_m) = 0 \Leftrightarrow f_i(c_1, \dots, c_m) = 0, \quad \text{para } i = 1, \dots, m \quad (2.27)$$

Para facilitar a notação, o conjunto de incógnitas será representado pelo vetor $\mathbf{C} = [c_1, \dots, c_m]$. Todas as funções $f_i(\mathbf{C})$ devem ser continuamente diferenciáveis. Pretende-se encontrar de forma iterativa um vetor solução $^*\mathbf{C}$ que resolva simultaneamente as m equações $f_i(\mathbf{C}) = 0$. As iterações estão identificadas pelo índice $k \in \mathbb{N}$. O vetor $^{[k]}\mathbf{C}$ corresponde a uma aproximação da solução $^*\mathbf{C}$, calculada no fim da iteração $k - 1$. Uma nova aproximação $^{[k+1]}\mathbf{C}$ é sempre calculada a partir da anterior $^{[k]}\mathbf{C}$, segundo a equação

$$^{[k+1]}\mathbf{C} = ^{[k]}\mathbf{C} + ^{[k]}\Delta \quad (2.28)$$

A iteração $k = 1$ necessita de ser inicializada com o vetor $^{[1]}\mathbf{C}$, que se caracteriza por possuir aproximações iniciais de cada c_j (obtidas arbitrariamente). O vetor $^{[k]}\Delta$, de comprimento m , é calculado solucionando o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_1} & \frac{\partial f_1(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_2} & \dots & \frac{\partial f_1(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_m} \\ \frac{\partial f_2(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_1} & \frac{\partial f_2(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_2} & \dots & \frac{\partial f_2(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_1} & \frac{\partial f_m(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_2} & \dots & \frac{\partial f_m(^{[k]}\mathbf{C})}{\partial c_m} \end{bmatrix} \cdot ^{[k]}\Delta = - \begin{bmatrix} f_1(^{[k]}\mathbf{C}) \\ f_2(^{[k]}\mathbf{C}) \\ \vdots \\ f_m(^{[k]}\mathbf{C}) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

À medida que k aumenta, o vetor $^{[k]}\mathbf{C}$ aproxima-se cada vez mais e converge para a solução real. Para parar o processo iterativo pode-se definir um número limite de iterações, ou então satisfazer um critério de paragem, como por exemplo:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m [f_i(^{[k+1]}\mathbf{C})]^2} \leq \varepsilon \quad (2.30)$$

O parâmetro ε é um pequeno valor de erro aceitável. No fim, o conjunto de parâmetros \mathbf{C} fica determinado e torna-se possível estabelecer $M(v)$. A aplicação deste método de Newton causa, no entanto, algumas dificuldades, principalmente por ser necessário calcular analiticamente m^2 derivadas e resolver um sistema de equações lineares em todas as iterações. Se surgirem problemas que impeçam a sua aplicação, existem ainda os chamados métodos de Newton modificados [26],

que evitam certas complicações. Estes podem ser encontrados na literatura sobre métodos numéricos.

Quando existem muitos pontos de calibração deve-se optar por regressão em vez de interpolação, para a função $M(v)$ refletir simplesmente uma tendência e não ser forçada através de todos os pontos (pela mesma razão explicada nos modelos lineares e polinomiais, nas subsecções 2.7.2 e 2.7.3, respetivamente). O método dos mínimos quadrados pode novamente ser utilizado, mas agora generalizado para qualquer tipo de função [26]. Considere-se que são utilizados n pontos $[x_i, v_i]$ ($i = 1, \dots, n$), m parâmetros c_j ($j = 1, \dots, m$) e $n > m$. A notação anterior para representar todos os parâmetros (incógnitas), $\mathbf{C} = [c_1, \dots, c_m]$, também será adotada. Este método baseia-se na minimização da função de erro quadrático total

$$S(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^n [x_i - M(v_i, \mathbf{C})]^2 \quad (2.31)$$

Isto traduz-se matematicamente em encontrar um vetor solução $^*\mathbf{C}$ cujos valores correspondam aos mínimos locais da função $S(\mathbf{C})$, ou seja:

$$\frac{\partial S(^*\mathbf{C})}{\partial c_j} = 0, \text{ para } j = 1, \dots, m \quad (2.32)$$

Esta condição dá origem ao seguinte sistema de equações:

$$-\sum_{i=1}^n [x_i - M(v_i, \mathbf{C})] \frac{\partial M(v_i, \mathbf{C})}{\partial c_j} = 0 \Leftrightarrow f_j(\mathbf{C}) = 0, \text{ para } j = 1, \dots, m \quad (2.33)$$

Note-se que o sistema 2.33 apresenta o mesmo formato encontrado anteriormente no sistema de interpolação 2.27. O método numérico de Newton é então novamente adequado para a resolução deste sistema de equações não lineares. A partir daqui, o processo iterativo para encontrar a solução $^*\mathbf{C}$ ocorre de forma semelhante ao já descrito nesta subsecção. No entanto, a complexidade é ainda maior, devido à presença das primeiras derivadas parciais de $M(v_i, \mathbf{C})$ nas funções $f_j(\mathbf{C})$, sendo eventualmente necessário calcular também as segundas derivadas parciais no decorrer do cálculo de $^{[k]}\Delta$. Poderão também ocorrer problemas de não convergência quando o vetor $^{[1]}\mathbf{C}$ possui aproximações iniciais muito distantes dos valores reais de solução. No fim obtém-se a função de regressão $M(v)$, que já não depende dos parâmetros \mathbf{C} .

2.7.5 Modelos de Funções Segmentadas

Os modelos de medição lineares, polinomiais e de funções generalizadas descrevem o comportamento inverso do sistema ao longo de todo o intervalo esperado de indicações. No entanto, poderá ser mais eficiente dividir este intervalo em várias secções e definir uma função simples para cada, em vez de utilizar uma só função complexa para o descrever totalmente. Daqui surgem as funções segmentadas, também denominadas *splines* [26], que correspondem à junção de várias

funções ligadas de uma maneira contínua e suave. Considere-se que $[v_a, v_b] \subset \mathbb{R}$ é o intervalo esperado de indicações. Dentro deste escolhem-se vários pontos v_k ($k = 0, \dots, m$), denominados de nós, pelo que $v_a = v_0 < v_1 < \dots < v_{m-1} < v_m = v_b$. Cada nó possui associado um valor conhecido de mensuranda x_k . Geralmente constrói-se uma tabela de pesquisa (*look-up table* [25]), onde se encontram os valores dos nós escolhidos:

Tabela 2.1: *Lookup table*. Tabela de pesquisa que contém os valores da indicação e mensuranda associados a cada nó da função segmentada.

Nó	0	1	...	m
Indicação	v_0	v_1	...	v_m
Mensuranda	x_0	x_1	...	x_m

O número total de nós $m + 1$ é obrigatoriamente menor ou igual ao número de pontos de calibração n , ou seja, $m + 1 \leq n$. Podem ser escolhidos poucos nós dentro de um grande número de pontos de calibração, mas geralmente ambos são coincidentes ($n = m + 1$). Os nós dividem $[v_a, v_b]$ em m segmentos. A cada segmento k é atribuída uma função $s_k(v)$ que descreve o comportamento inverso do sistema dentro do intervalo $[v_{k-1}, v_k]$. O modelo de medição resultante assume então a forma de uma função definida por ramos:

$$\hat{x} = M(v) = \begin{cases} s_1(v) & \text{se } v_0 \leq v < v_1 \\ s_2(v) & \text{se } v_1 \leq v < v_2 \\ \vdots & \\ s_m(v) & \text{se } v_{m-1} \leq v \leq v_m \end{cases} \quad (2.34)$$

As funções $s_k(v)$ resultam de interpolações de nó em nó. A mais simples é a interpolação proximal, que determina o vizinho v_k mais próximo de v e considera o correspondente x_k igual a \hat{x} . Este método resulta em erros muito elevados e só poderá ser minimamente eficaz quando a diferença entre x_k e x_{k+1} é muito reduzida e existe uma grande densidade de nós. Mas geralmente efetuam-se interpolações lineares, cujas aproximações produzidas são bastante satisfatórias. Neste caso, as $s_k(v)$ assumem a seguinte forma:

$$s_k(v) = x_{k-1} + \frac{v - v_{k-1}}{v_k - v_{k-1}}(x_k - x_{k-1}) \quad , \quad \text{para } k = 1, \dots, m \quad (2.35)$$

A função *spline* linear resultante, apesar de ser contínua ao longo do intervalo $[v_a, v_b]$, traz um inconveniente: não apresenta suavidade, possuindo quebras precisamente nos nós. Isto significa que não é continuamente diferenciável. Para solucionar este inconveniente impõem-se condições que garantam suavidade, mas que requerem polinómios interpoladores de graus superiores a 1. É comum serem utilizadas *splines* cúbicas para o efeito [25]. No entanto, o procedimento torna-se mais complexo, podendo ser encontrado na literatura [26].

2.7.6 Modelos Multidimensionais

Os modelos até aqui descritos consideram de forma simplista que a estimativa da mensuranda depende apenas da indicação fornecida. Na maior parte dos casos práticos de calibração é o suficiente. Mas na realidade, o comportamento do sistema depende e é afetado por inúmeras variáveis, existindo muitas outras relações para além da referida. Os modelos multidimensionais envolvem diversas variáveis que correspondem a grandezas de influência. Um modelo dinâmico é um tipo de modelo multidimensional que também considera o tempo. Considere-se um modelo de medição que relaciona \hat{x} com a variável v , as variáveis de influência $[t, g_1, \dots, g_m]$ e um conjunto de parâmetros de ajuste $[c_1, \dots, c_l]$, sendo do tipo:

$$\hat{x} = M(v, t, g_1, \dots, g_m, c_1, \dots, c_l) \quad (2.36)$$

Pretende-se determinar os parâmetros c_j ($j = 1, \dots, l$) para que se tornem constantes na função, ajustando-a aos dados experimentais. Obtém-se assim um modelo multidimensional do tipo $\hat{x} = M(v, t, g_1, \dots, g_m)$. Ao contrário dos anteriores, este depende não só da indicação fornecida, mas também de valores medidos de cada grandeza de influência e do tempo. A sua utilização implica que durante o eventual funcionamento do sistema haja acesso a estas medições, para ser possível produzir estimativas da mensuranda. Obviamente que as indicações são sempre observáveis, mas nem sempre existem meios de observação das outras grandezas referidas. Caso isto se verifique, então qualquer g_k ($k = 1, \dots, m$) ou t que não possa ser conhecida fica impedida de aparecer como variável na função $M(v, t, g_1, \dots, g_m)$, uma vez que não poderá ser medida e permanecerá indeterminada. A única hipótese é assumi-la como outro parâmetro [10] e modelar a função nesse sentido. Se todas as variáveis forem reduzidas a parâmetros, então em vez de um modelo multidimensional acaba-se por obter um unidimensional do tipo $\hat{x} = M(v)$, que é bastante mais simples. Este problema deve ser considerado logo à partida do processo de desenvolvimento do modelo.

Desenvolver um modelo multidimensional é um processo naturalmente mais complexo do que os anteriores. Pretende-se que este determine, de certa forma, se as indicações encontram-se afetadas por grandezas de influência e, com base na decisão, compense matematicamente os efeitos provocados por estas. Portanto, devem-se considerar e supor relações não só entre v e x , mas também entre v e cada uma das g_k e t . Para ser possível inferir tais relações é essencial uma grande quantidade de dados experimentais e uma extensiva análise de cada uma em separado. Juntar tudo isto num modelo multidimensional poderá ser uma tarefa bastante árdua devido à nossa capacidade limitada de visualizar funções multivariável. Outra grande dificuldade é conseguir que o modelo distinga automaticamente se as indicações variaram devido à mensuranda ou devido aos outros fatores, durante o funcionamento normal e não supervisionado do sistema. Um modelo eficaz deverá ter certa capacidade preditiva nestes casos, requerendo mais complexidade do que meras funções. Por questões práticas de simplicidade, é comum considerar-se apenas 1 variável de influência g_1 . Para além disso, normalmente recorre-se a funções polinomiais generalizadas,

em que o modelo apresenta simples formatos do tipo:

$$\hat{x} = \sum_{a=0}^c \sum_{b=0}^d c_{ab} v^a g_1^b \quad (2.37)$$

Em que c e d correspondem ao maior grau de v e g_1 , respetivamente. Os coeficientes c_{ab} são parâmetros a determinar. Outros modelos mais complexos e que revelam ser mais robustos na compensação dos efeitos provocados pelas grandezas de influência são os baseados em *machine learning*, que são cada vez mais utilizados em sistemas de medição eletrónicos.

Devido à introdução mais variáveis, os pontos experimentais de calibração não são iguais aos típicos, pois necessitam de ter mais dimensões para representarem as medições de cada g_k e t . Assumem então uma forma do tipo $[x_i, v_i, t_i, g_{1i}, \dots, g_{mi}]$ ($i = 1, \dots, n$). É necessário ter um grande número de pontos para se obter um modelo com boa exatidão, o que implica testes experimentais bastante prolongados. A determinação de quaisquer parâmetros associados ao modelo baseia-se novamente na utilização dos pontos referidos. Os métodos de interpolação ou regressão são bastante utilizados nas funções multivariável, sendo semelhantes aos já descritos nas subsecções anteriores, bastando adaptá-los para mais variáveis. Nos modelos de *machine learning*, os pontos são a fonte de aprendizagem na fase de treino.

A temperatura é uma grandeza de influência que afeta particularmente o comportamento de sistemas de medição eletrónicos e, por este motivo, é frequentemente considerada no modelo de medição. Z. Wang *et al.* [32] calibraram um transmissor de pressão com um modelo de medição multidimensional do tipo polinomial, considerando que a pressão p dependia das variáveis indicação v e temperatura ambiente y , apresentando o seguinte formato geral:

$$p = c_1 v^2 + c_2 v + c_3 y^2 + c_4 y + c_5 v y + c_6 \quad (2.38)$$

Utilizaram o *software* Matlab® para calcular os coeficientes que melhor encaixavam a superfície quadrática nos pontos experimentais, segundo o método de regressão dos mínimos quadrados. Devido à inclusão do fator temperatura, a exatidão e erros de medição reduziram consideravelmente. W. Xie *et al.* [33] abordaram este fator com um modelo de *Support Vector Machines*, cujos parâmetros ajustavam-se de uma forma auto-adaptativa na fase de treino. Concluíram que era um modelo mais robusto do que os tipicamente utilizados e que resultava numa maior estabilidade e exatidão.

Os efeitos provocados pelo *drift* e histerese têm uma incidência elevada em sistemas eletrónicos e requerem modelos multidimensionais para serem considerados. No primeiro, é necessário distinguir se a mensuranda se encontra a variar lentamente ou se é o *drift* a afetar as indicações. No segundo, a direção em que a mensuranda varia é difícil de ser determinada, sendo necessário considerar as medições dos instantes anteriores. Para aplicações estáticas e dinâmicas do sistema de medição é essencial ter em conta os dois fatores referidos. J. A. Flórez e A. Velásquez [13] abordaram particularmente estes problemas, na calibração de um sensor de pressão. Para ultrapassarem o comportamento de *drift* utilizaram um critério baseado na primeira derivada temporal das

indicações (sinal de tensão). Os testes experimentais estáticos demonstraram que nessas condições, a derivada apresentava valores típicos abaixo de 0,2 V/s. Logo, para derivadas acima deste valor, então era a mensuranda que estava realmente a variar. Por outro lado, quando a derivada do sinal ficava abaixo do valor referido, então as variações na tensão eram devidas ao *drift*. Quando se verificava este efeito, considerava-se apenas o último valor de tensão cuja derivada ainda estava acima de 0,2 V/s. O modelo de medição era uma função logarítmica, previamente obtida por regressão. A influência do *drift*, apesar de não ter ficado totalmente eliminada, foi efetivamente reduzida. Ainda no mesmo artigo, procuraram também resolver o problema da histerese, baseando-se no trabalho de Rick S. Hall *et al.* [16]. Necessitaram de utilizar outro modelo de medição para adotar este efeito. Consideraram que o cálculo da pressão p dependia não só da tensão v , mas também do seu integral em movimento i (dos últimos 0,5 s, com um fator de peso linear). A função era um polinómio geral de 4º grau:

$$p = c_1 + c_2v + c_3v^2 + c_4v^3 + c_5v^4 + c_6i + c_7i^2 + c_8i^3 + c_9i^4 \quad (2.39)$$

Os coeficientes foram determinados por *software* através de um método de regressão múltipla. Com o modelo desenvolvido, o efeito da histerese foi consideravelmente reduzido, uma vez que o integral fornecia informações acerca da direção de variação da mensuranda. Outros autores como Z. Geng *et al.* [34] e S. Urban *et al.* [35] optaram por uma abordagem probabilística e estatística baseando-se em processos Gaussianos, para compensação do *drift* e histerese, respetivamente. Os modelos de medição desenvolvidos conseguiam não só quantificar e compensar os efeitos referidos, mas também forneciam intervalos de confiança e incertezas dos valores medidos.

2.7.7 Modelos Explicativos

Todos os modelos referidos até aqui consideram o sistema como uma “*black-box*”, apenas descrevendo o seu comportamento do ponto de vista externo, com base em dados puramente empíricos e suposições generalistas. Ao contrário dos anteriores, os modelos explicativos consideram o sistema como uma “*white-box*”, procurando explicar o seu funcionamento, isto é, o comportamento do ponto de vista interno, com base em dados teóricos acerca dos elementos que o constituem e os seus inter-relacionamentos. A ideia é modelar a ordem causal dos acontecimentos que ocorrem ao longo cadeia de medição (série de elementos internos do sistema), desde o estímulo provocado pela mensuranda até à indicação produzida. Isto geralmente inclui leis físicas e químicas conhecidas em que o princípio de operação do sistema assenta [25]. Com estas informações produz-se primeiramente um modelo de transdução do tipo:

$$\hat{v} = T(x, t, g_1, \dots, g_m, c_1, \dots, c_l) \quad (2.40)$$

Tal como nos modelos multidimensionais (subsecção 2.7.6), o modelo 2.40 pode incluir os conjuntos de parâmetros de ajuste $[c_1, \dots, c_l]$ e de grandezas de influência $[t, g_1, \dots, g_m]$. O efeito destas últimas variáveis, tal como já foi explicado, pode também ser reduzido a parâmetros. O

número de parâmetros por determinar é normalmente bastante pequeno, pois os dados teóricos já fornecem grande parte deles. Quanto aos que restam, são determinados a partir dos dados empíricos, utilizando-se os n pontos de calibração $[x_i, v_i]$ e/ou $[t_i, g_{1i}, \dots, g_{mi}]$ ($i = 1, \dots, n$). Os métodos de interpolação ou regressão são novamente os mais utilizados. Obtém-se assim um modelo do tipo $\hat{v} = T(x, t, g_1, \dots, g_m)$.

A partir do modelo de transdução desenvolvido pretende-se determinar o seu inverso, o modelo de medição do tipo $\hat{x} = M(v, t, g_1, \dots, g_m)$. Esta tarefa poderá ser bastante complexa e, por vezes, até impossível de executar. Existem quatro situações que podem ocorrer: (1) caso $T(x)$ seja unidimensional e algebricamente invertível, pode-se inverter diretamente o modelo de transdução e obter $\hat{x} = T^{-1}(v) = M(v)$; (2) caso o modelo de transdução seja multidimensional, pode-se manipular a sua estrutura matemática de modo a colocar em evidência a variável x e considerá-la como dependente, enquanto que a variável v torna-se independente. Obtém-se o modelo inverso $\hat{x} = M(v, t, g_1, \dots, g_m)$; (3) caso não seja possível executar (1) e (2) devido à dificuldade ou impossibilidade de inversão do modelo de transdução, pode-se então aproximá-lo a outro modelo mais simples e invertível. No entanto, isto tem o custo de grande perda de exatidão; (4) caso se verifique a situação em (3) e não se pretenda construir outro modelo aproximado, a única hipótese é permanecer com o modelo de transdução obtido e não o inverter. Mesmo na situação (4) é possível continuar a calibração e implementar um modelo que forneça resultados de medição. Existem soluções para calcular \hat{x} a partir do modelo de transdução. No entanto, estas trazem certos problemas e inconvenientes. O ideal é sempre possuir um modelo de medição para eventual implementação.

Adotando um modelo explicativo, E. Zehr *et al.* [14] calibraram um sistema de medição para avaliação da força exercida no pé durante a marcha. Os elementos sensitivos eram resistências sensíveis à força (FSRs), fabricadas pela Interlink Electronics⁴. Os fabricantes afirmavam que a condutância g das resistências seguia uma lei do tipo

$$g = \frac{Af}{B + f} \quad (2.41)$$

em que f correspondia à força aplicada na FSR, o parâmetro A equivalia à condutância máxima e o B à força em que era atingida metade de A . Era aconselhado um circuito divisor de tensão para a utilização da FSR, com uma tensão de entrada V_{in} , a resistência r da FSR, a tensão de saída v e uma resistência R em série. Esta série de elementos era facilmente modelada pela lei de Ohm, obtendo-se a seguinte equação:

$$v = \frac{R}{r + R} V_{in} \quad (2.42)$$

Sendo $r = 1/g$ e substituindo-a na equação 2.42, facilmente encontraram a função de transferência do sistema, que relacionava v com f :

$$v = \frac{ARV_{in}f}{f(AR + 1) + B} \quad (2.43)$$

⁴<http://interlinkelectronics.com/>

E a função inversa de 2.43 correspondia à função de medição:

$$f = \frac{Bv}{ARV_{in} - v(AR + 1)} \quad (2.44)$$

A determinação dos parâmetros associados a 2.43 envolvia métodos não lineares de regressão. Por motivos de simplicidade, os autores acabaram por utilizar outro circuito numa tentativa de linearização da resposta do sistema.

2.8 Implementação e Utilização do Modelo

Uma das características de um sistema nunca antes calibrado é produzir indicações que representam a magnitude de uma grandeza diferente daquela que se pretende medir. É evidente que deste modo não é possível efetuar medições com o sistema, uma vez que não fornece resultados sobre a grandeza adequada. O modelo desenvolvido anteriormente (secção 2.7) resolve metade deste problema, permitindo efetuar medições da mensuranda. A partir desse momento, o sistema pode ser considerado como calibrado. No entanto, só se conseguem obter resultados de medição de forma externa ao sistema, calculando-os a partir do modelo. Por motivos práticos, pretende-se que o sistema faça esse trabalho de maneira independente, eliminando a outra metade do problema. É nesta fase que as indicações são ajustadas e corrigidas para coincidirem com resultados de medição. Este é o ponto chave e condição necessária para tornar o sistema apto e funcional para realizar medições.

Nesta fase pretende-se que o modelo de medição desenvolvido seja implementado e integrado no próprio funcionamento do sistema. Assim, este passa a utilizar o modelo para produzir diretamente resultados de medição a partir das indicações, de forma totalmente independente. O resultado desta junção e interação é o sistema de medição calibrado e ajustado, tornando-se funcional. A metodologia desta fase depende das características do sistema e do modelo desenvolvido. No caso das indicações serem fornecidas de forma analógica por meio de um ponteiro, então a operação consiste simplesmente em atribuir a cada traço da escala a estimativa de mensuranda calculada com o modelo. Mas este é um dos casos mais simples de implementação. Geralmente, os modelos são bastante mais complexos e a sua implementação requer metodologias mais elaboradas. Na maior parte das situações é necessário ajustar fatores do funcionamento do sistema e/ou introduzir novos elementos, sempre no sentido de transformar as indicações nos respetivos resultados de medição. Em sistemas eletrónicos poderá ser necessário programar um algoritmo do modelo e até incluir um microprocessador para os cálculos associados. Por exemplo, o medidor de pressão plantar paraTec™ possui incorporado um microcontrolador que permite calcular automaticamente a pressão exercida, utilizando um modelo em que se podem escolher definições para situações estáticas e dinâmicas [19]. Relativamente ao algoritmo que normalmente se implementa num sistema eletrónico, este deve ter acesso às seguintes variáveis durante o processamento das medições: (1) o valor da indicação produzida; (2) as medições das grandezas de influência consideradas, em modelos multidimensionais (que devem ser obtidas a partir de outros sistemas

calibrados e ajustados); (3) o tempo, em modelos dinâmicos (que pode ser obtido a partir do próprio sistema, com um circuito de *clock*, por exemplo); (4) os parâmetros associados ao modelo ou a tabela de *look-up* (ver subsecção 2.7.5) (que devem estar guardados no sistema em elementos de memória). A computação da estimativa da mensuranda deve ser efetuada idealmente a partir do modelo de medição. Mas na impossibilidade de desenvolvimento deste, um modelo de transdução do tipo $\hat{v} = T(x, t, g_1, \dots, g_m)$ pode também ser utilizado para o efeito. Existem métodos numéricos que determinam uma estimativa de x como solução da equação $v - T(x, t, g_1, \dots, g_m) = 0$. É comum ser utilizado o método iterativo de Newton de resolução de equações não lineares [25, 26] (que consiste no mesmo método explicado na subsecção 2.7.4, com a diferença que em vez de um sistema de equações tem-se apenas uma). No entanto, poderão ser necessárias muitas iterações até atingir-se uma aproximação razoável, aspeto que pode prejudicar a rapidez das medições (que é essencial quando se pretendem medições em tempo real). Para além disto, os erros tornam-se bastante elevados a baixas sensibilidades (quando a primeira derivada da função de transdução se aproxima de zero) [25].

2.9 Verificação e Finalização

Após a fase anterior obteve-se um sistema calibrado e ajustado, podendo ser considerado funcional. Torna-se então possível realizar medições com este sistema de forma independente. Mas desconhece-se ainda a eficácia do mesmo. Por este motivo, depois de qualquer ajuste realizado deve-se sempre voltar a calibrar o sistema, para se extraírem informações e conclusões acerca do sucesso da operação. A verificação da mesma é fundamentalmente uma nova calibração, que agora envolve apenas o primeiro passo (uma vez que o sistema já fornece indicações coincidentes com resultados de medição). Pretende-se efetuar a comparação entre os valores verdadeiros da mensuranda x e os respetivos valores medidos pelo sistema r . Como o verdadeiro valor de qualquer grandeza é sempre indeterminado por natureza, assume-se que x corresponde a valores aceites convencionalmente, com incertezas de medição apropriadas para a situação (idealmente negligenciáveis). Estes podem ser obtidos novamente a partir do sistema utilizado nos testes experimentais (secção 2.5), que garantia medições provenientes de padrões. Geralmente comparam-se as medições de ambos os sistemas num gráfico de r em função de x , ao longo de toda a escala de *inputs*. Por exemplo, M. Zequera *et al.* [19] fizeram testes de verificação do paroTec™ em situações estáticas e dinâmicas, produzindo um gráfico para cada e observando as diferenças de resultados. Destes gráficos extraíram medidas de histerese, linearidade e exatidão, que são alguns dos indicadores da performance do sistema. Wang Z. *et al.* [32], nos testes de verificação de um sensor de pressão, tiveram em conta duas condições diferentes de temperatura ambiente, para verificarem a eficácia do modelo de medição multidimensional implementado. Um sistema ideal produziria em qualquer situação um gráfico linear com declive igual a 1 ($r = x$). No entanto, na realidade existem sempre discrepâncias entre r e x . A medida de discrepância denomina-se de

erro, sendo calculado da seguinte forma:

$$\varepsilon_a = r - x \quad (2.45)$$

ε_a corresponde ao erro absoluto de medição. O erro relativo ε_r é obtido a partir do anterior, sendo expresso numa percentagem:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{x} \times 100 \quad (2.46)$$

O erro é uma medida da exatidão do sistema. Quando as medições oferecem menor erro diz-se que possuem maior exatidão [36].

A incerteza das medições também é um aspeto importante para ser avaliado. Este estudo requer métodos estatísticos, considerando que se realizaram n medições r_i ($i = 1, \dots, n$) do mesmo valor de x , sob condições semelhantes. Primeiramente é necessário calcular a média aritmética das medições \bar{r} , que corresponde ao valor esperado [37]:

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2.47)$$

As medições individuais r_i diferem entre elas devido a variações aleatórias nas grandezas de influência ou quaisquer outros efeitos aleatórios. A variância $s^2(r)$ das medições é a melhor medida estatística para refletir estes fatores [37]:

$$s^2(r) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \quad (2.48)$$

A incerteza u equivale à raiz quadrada positiva da variância, correspondendo ao desvio-padrão [37]:

$$u = \sqrt{s^2(r)} \quad (2.49)$$

Esta medida reflete a não exatidão do sistema ou, por outras palavras, até que ponto poderão estar erradas as medições [38]. É também um indicador da dispersão dos valores, refletindo a precisão do sistema.

A análise das medidas referidas ditará o sucesso da operação realizada. Se os erros de medição e incertezas forem demasiado elevados (segundo limites aceitáveis e pré-estabelecidos), então o sistema não é fiável para ser utilizado. Neste caso é necessário efetuar ajustes adicionais, seguidos de outra calibração de verificação. Os ajustes devem ser no sentido de corrigir e melhorar aspetos da performance e funcionamento do sistema. Estes incluem a alteração dos parâmetros associados ao modelo de medição, correção de tendências ou desvios nas indicações, minimização da influência de outras grandezas, entre outros. Espera-se que após a eventual recalibração, o sistema apresente mais exatidão e precisão do que anteriormente, para que seja válida a sua verificação.

2.10 Considerações Finais do Capítulo

A calibração é fundamentalmente uma operação experimental de comparação e estabelecimento de relações entre valores medidos por um sistema de confiança e valores fornecidos pelo sistema sob calibração. Chegou-se à conclusão que calibrar pode envolver um ou dois passos. O primeiro passo consiste na execução de testes experimentais para analisar a performance e caracterizar o comportamento do sistema sob calibração, comparando-o com um sistema que garante maior exatidão, precisão e qualidade. O segundo passo utiliza as informações do anterior para o desenvolvimento de um modelo de medição para o sistema sob calibração, a partir do qual podem ser produzidos resultados de medição e efetivamente medir-se a mensuranda. Uma calibração de raiz envolve os dois passos referidos, sendo particularmente condição necessária para que se possam efetuar medições a partir de um sistema nunca antes calibrado. Após uma calibração de raiz, geralmente opta-se por ajustar o funcionamento do sistema de modo a incluir o modelo de medição, para que as futuras medições da mensuranda sejam produzidas diretamente pelo sistema e obtidas de forma independente. Um sistema previamente calibrado e ajustado neste aspeto passa a necessitar apenas do primeiro passo de calibração, uma vez que fornece diretamente medições da mensuranda (quer sejam exatas ou não). Os sistemas devem ser periodicamente calibrados para se verificar a exatidão das medições. Quando não atingem certos requisitos estipulados, então os sistemas devem sofrer ajustes no seu funcionamento no sentido de melhorar a sua performance, seguidos sempre de outra calibração.

Apesar das metodologias de calibração serem bastante distintas e específicas para cada sistema de medição, colocando até em causa o consenso sobre o que realmente significa “calibrar”, conseguiu-se ultrapassar este problema apresentando-se um modelo geral da calibração, que pode ser eficazmente utilizado como a base concetual, metodológica e procedimental transversal a todas as calibrações. Uma calibração de raiz caracteriza-se pela seguinte sequência de operações:

1. A primeira fase consiste na reunião de condições e requisitos prévios para todo o procedimento. O primeiro aspeto essencial é possuir controlo sobre o ambiente de teste, no sentido de dominar fisicamente a mensuranda e qualquer outra grandeza de influência que se considere. O segundo aspeto essencial é a existência de outro sistema que meça a mesma grandeza, mas que garanta maior exatidão, qualidade e confiança do que o sistema sob calibração. É fundamental que as medições do primeiro possam ser consideradas como os verdadeiros valores da mensuranda, aqueles que são o termo de comparação. Por fim, o último aspeto essencial é providenciar um meio de gravação dos valores produzidos por ambos os sistemas.
2. A segunda fase equivale ao primeiro passo de calibração, e consiste na execução de testes experimentais em que o sistema sob calibração interage com valores conhecidos de mensuranda e possivelmente grandezas de influência. Durante os testes são registados os pontos de calibração, que correspondem a valores simultaneamente medidos de todas as variáveis envolvidas (mensuranda, indicação e grandezas de influência). O modo como se aplica a

mensuranda divide a calibração em dois tipos: estática e dinâmica. Na primeira aplicam-se distintos valores constantes de mensuranda. Na segunda aplicam-se valores de mensuranda variáveis ao longo do tempo. Os testes permitem obter informações qualitativas e/ou quantitativas acerca das especificações e comportamento do sistema, estabelecendo-se também relações entre as variáveis envolvidas.

3. A terceira fase equivale ao segundo passo de calibração, e consiste na modelação matemática do comportamento hipoteticamente inverso do sistema sob calibração. Os modelos de medição podem ser determinísticos ou estocásticos, envolvendo tabelas de valores, funções, fórmula ou estruturas matemáticas mais complexas. Os mais comuns são os lineares, os polinomiais, os de funções generalizadas (adequando-se qualquer tipo de função), os de funções segmentadas (denominadas *splines*, que dividem o intervalo de indicações em segmentos e modelam o comportamento em cada um deles), os multidimensionais (que consideram outras variáveis de influência para além das indicações) e os explicativos (que baseiam-se no funcionamento interno do sistema). Todos os modelos caracterizam-se por possuírem parâmetros (ou coeficientes) associados, que os ajustam aos pontos de calibração obtidos na fase anterior. Os métodos de interpolação e regressão são os mais comuns para se determinarem os parâmetros. Em modelos de *machine learning*, os parâmetros ajustam-se automaticamente na fase de treino.

Após a calibração de raiz, geralmente passa-se para uma fase de ajuste e eventual verificação do sistema:

4. A quarta fase consiste na implementação do modelo de medição no próprio funcionamento do sistema para que ele próprio o utilize de forma independente. São feitos ajustes ao sistema no sentido das suas indicações passarem a corresponder aos valores medidos pelo modelo. Isto pode incluir a alteração e/ou acrescentamento de elementos internos e ações corretivas. A tarefa pode ser tão simples quanto adicionar uma escala de medição, ou complexa ao ponto de se ter de programar um algoritmo do modelo desenvolvido. No fim, o sistema passa a produzir por si só resultados de medição e as eventuais recalibrações apenas envolvem a segunda fase descrita anteriormente.
5. A quinta fase consiste na verificação da performance do sistema. É efetuada uma calibração para comparar os verdadeiros valores da mensuranda com os medidos pelo sistema. Normalmente produzem-se gráficos e extraem-se medidas de exatidão e precisão, como o erro e a incerteza. Verifica-se assim se o sistema cumpre com os requisitos estipulados.
6. A sexta fase aplica-se quando o sistema não cumpre com os requisitos estipulados na fase anterior. Então, efetuam-se ajustes aos parâmetros do modelo (ou a outros fatores), no sentido de melhorar a performance do sistema, e volta-se a realizar uma nova calibração e verificação. Se o sistema cumprir os requisitos, então a verificação é validada e termina o procedimento.

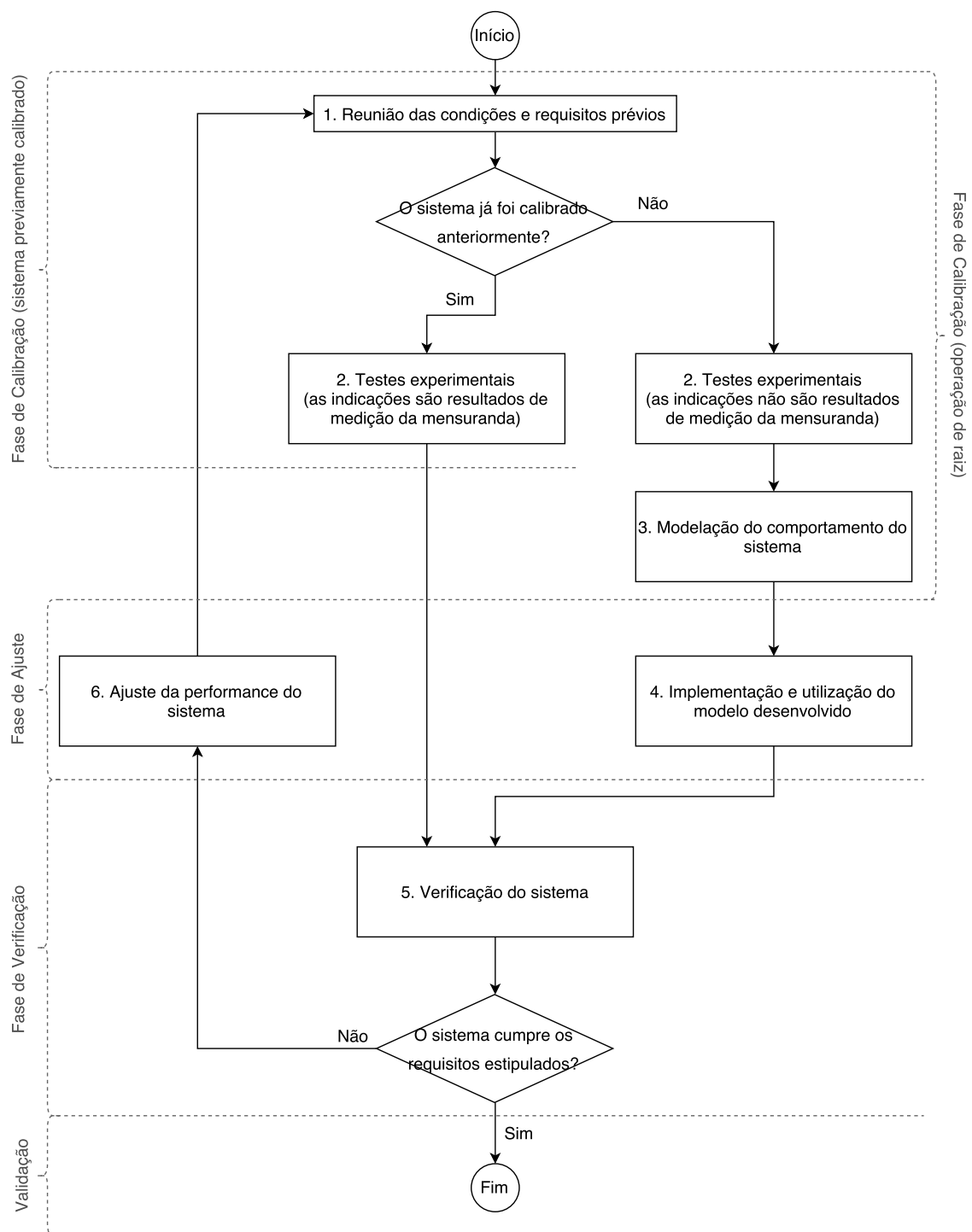


Figura 2.4: Diagrama do procedimento das operações de calibração, ajuste e verificação.

Todo o procedimento referido pode ser concisamente resumido no diagrama da figura 2.4.

Capítulo 3

1º Passo da Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o primeiro passo da calibração que foi executada a um sistema medidor de pressão plantar. O desenvolvimento deste trabalho apoiou-se na base teórica estabelecida no capítulo anterior. O sistema utilizado encontra-se descrito em detalhe na secção 3.3. A primeira fase do trabalho envolveu o planeamento de testes experimentais, no qual se reuniram as condições e requisitos necessários ao tipo de calibração pretendida (secção 3.4). De modo a extraírem-se informações mais completas e detalhadas acerca do sistema, realizaram-se dois tipos de teste: dinâmico e estático (secções 3.5 e 3.6, respetivamente). A metodologia utilizada e a análise de resultados encontram-se nas respetivas secções de cada teste. Por fim, a secção 3.7 apresenta um breve resumo de todo o capítulo e as principais conclusões retiradas.

3.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho consistiu em transformar um sistema descalibrado num sistema totalmente funcional e eficaz para medições de pressão plantar. Atingir este objetivo envolveu outros mais específicos a este passo de calibração:

- Conhecer o comportamento estático e dinâmico do sistema;
- Obter pontos de calibração;

3.3 Descrição do Sistema

O sistema medidor de pressão plantar utilizado neste trabalho era constituído por vários elementos, representados no diagrama da figura 3.1. O primeiro elemento correspondia a um sensor

que recebia diretamente o *input* físico da pressão. A resposta produzida pelo mesmo era processada pelo dispositivo TUNE. Este originava um sinal de *output* que era captado por uma placa de aquisição. O controlo da mesma era efetuado através de um *software* num computador portátil, que analisava e processava os dados, para além de mostrar o *output* final. Inicialmente, devido a nunca ter sido calibrado, o sistema não podia ser utilizado para se efetuarem medições, uma vez que o seu *output* não correspondia a valores de pressão. Era precisamente por este motivo que se submeteu o sistema a uma calibração de raiz no decorrer deste trabalho.

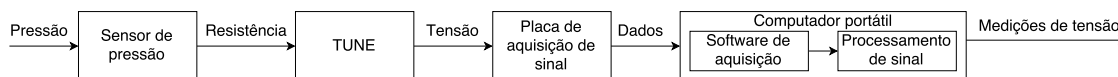


Figura 3.1: Diagrama dos elementos do sistema de medição.

O sensor de pressão utilizado pelo sistema encontra-se na figura 3.2. Este continha elementos sensitivos que se denominavam de células, fabricados com diversas camadas de polímeros isolantes e de materiais condutores. As camadas estavam desenhadas e conjugadas de tal forma que o seu efeito resultava em várias resistências sensíveis à força (FSRs) unidas em paralelo. Devido à sensibilidade das mesmas, a resistência total da célula r_{cell} variava em função da pressão p exercida na sua superfície, seguindo uma relação de proporcionalidade inversa ($r_{\text{cell}} \propto 1/p$). Quando não se aplicava pressão, a condutância da célula era praticamente nula, estando virtualmente em circuito aberto ($r_{\text{cell}} \rightarrow \infty$). Este comportamento também se mantinha quando eram exercidas pressões relativamente baixas, uma vez que existia uma zona morta de resposta na qual a célula não apresentava sensibilidade. Apenas acima de uma determinada pressão de ativação é que se tornava sensível e era evidenciada resposta. A partir daí, r_{cell} diminuía à medida que p aumentava. Se a pressão começasse a atingir valores muito elevados, a sensibilidade tendia a baixar consideravelmente, uma vez que r_{cell} começava a aproximar-se do valor mínimo fisicamente possível determinado pelas propriedades dos materiais (de forma semelhante a um limiar de saturação).

O formato das células sensitivas era retangular com cantos arredondados, medindo 3,40 cm de comprimento e 1,75 cm de largura, o que correspondia a uma área passível de ser atuada equivalente a 5,95 cm². Estas, por sua vez, estavam contidas num substrato flexível de plástico em forma de palmilha (figura 3.2). A sua espessura media 0,10 cm para que fosse fácil e comodamente encaixado entre a planta do pé e o calçado. De modo a adequar-se a diferentes pés, existiam cinco tamanhos distintos: S, M, L, XL e XXL (do mais pequeno para o maior, respetivamente). A disposição das células nas palmilhas estava definida de forma a serem medidos 4 pontos chave de pressão (1 por cada célula), que correspondiam às regiões anatómicas do hálux, zonas medial e lateral do metatarso e calcânea.

Os circuitos de acesso às células sensitivas estavam embutidos nas palmilhas. As conexões eram estabelecidas através de terminais que se encontravam numa pequena placa eletrónica, localizada na extremidade de uma extensão lateral da palmilha. Cada célula possuía um terminal individual que correspondia a um dos seus polos. O outro polo era acedido através de um terminal comum conetado a todas.

O sensor de pressão conetava-se ao TUNE (figura 3.3). Este dispositivo possuía elementos internos de processamento analógico e digital de sinal. As células sensitivas encontravam-se incorporadas num circuito analógico, funcionando como resistências variáveis. A alteração da sua condutividade provocava a variação do *output* do circuito, que correspondia a um sinal de tensão v . Quando não se aplicava pressão no sensor (*standby*), v permanecia constante em 2,5 V. Com o aumento da pressão, v decrescia ($v \propto 1/p$).

O sinal analógico proveniente do TUNE era convertido em digital através de meios externos, com uma placa de aquisição NI myDAQ. Executou-se a amostragem a uma taxa de 1000 Hz, igual à utilizada pelo TUNE durante o seu funcionamento independente. Relativamente à resolução utilizada na quantificação do sinal, esta foi imposta pela própria placa, que permitia uma sensibilidade máxima de 1×10^{-6} V. Para além de efetuar a conversão referida, a placa também alimentava o TUNE através de um terminal com *output* constante de 5 V.

O controlo da aquisição de sinal era executado num computador portátil, através de um programa desenvolvido no *software* LabView[®], que comunicava com a NI myDAQ por USB (*Universal Serial Bus*). A interface permitia iniciar/parar a aquisição a qualquer momento e visualizar em tempo real o gráfico da tensão produzida. O programa também incluía um método de gravação dos dados que exportava um ficheiro de texto com os valores medidos e os respetivos *timestamps*.

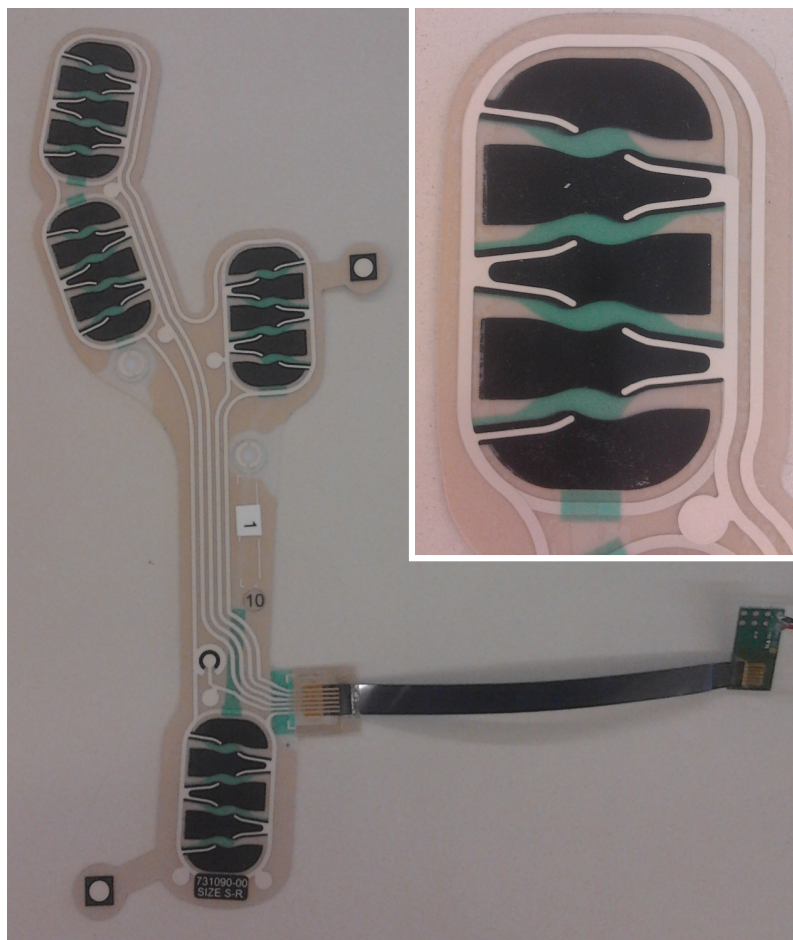


Figura 3.2: Sensor de pressão em forma de palmilha. Uma das células sensitivas encontra-se ampliada para evidenciar os seus pormenores.



Figura 3.3: Dispositivo TUNE.

3.4 Planeamento dos Testes Experimentais de Calibração

A operação de calibração iniciou-se com a realização de testes experimentais, com o objetivo de se estudar e caracterizar o comportamento do sistema. Mas antes de serem executados, estes exigiam um minucioso planeamento prévio. Era imprescindível que se garantissem as condições necessárias ao tipo de calibração pretendida e se cumprissem os requisitos associados, para que a operação pudesse ser executada com sucesso. A escolha dos materiais, equipamentos e protocolos para a realização dos testes dependia de cinco aspetos considerados essenciais que deveriam ser garantidos:

1. Existência de um ambiente de teste que possibilitasse um controlo mecânico da pressão exercida nos sensores;
2. Medição antecipada dos “verdadeiros” valores de pressão aplicados aos sensores, a partir de outro instrumento que garantisse alta exatidão e precisão (que estivesse calibrado e ajustado segundo padrões de qualidade);
3. Controlo numérico automático do valor da pressão aplicada, que permitisse calibrações estáticas e dinâmicas na gama de pressões entre zero e 5 bar;
4. Gravação automática dos valores de tensão de resposta, pressão exercida e *timestamps* associados a ambos;
5. Condições mecânicas de atuação dos sensores constantes e que simulassem o melhor possível a planta do pé.

Tendo em conta os aspetos enumerados, escolheu-se a máquina de ensaios mecânicos Instron ElectroPuls™ E1000 (figura 3.4) para se realizarem os testes, localizada no Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este equipamento era normalmente utilizado para estudos das propriedades mecânicas de materiais, no qual se realizavam ensaios de fadiga, tração, compressão e flexão, de forma estática ou dinâmica. Mas, para além da finalidade referida, também era possível serem efectuados testes personalizados e adaptados a outras finalidades, pois o equipamento permitia uma vasta customização. A máquina era constituída por um atuador eletromecânico linear, que se movia ao longo de um eixo vertical. Na plataforma inferior encontrava-se uma célula de carga (Dynacell) diretamente sob o atuador, alinhada com o mesmo eixo. Na extremidade inferior do atuador e sobre a célula de carga existiam amarras onde se podiam encaixar provetes ou outro tipo de sólidos. Qualquer objeto que se encontrasse entre estes dois elementos sofria uma força/pressão devido ao deslocamento ascendente ou descendente do atuador. O controlo deste movimento garantia um domínio físico da força/pressão que podia ser exercida nos sensores, cumprindo-se o primeiro aspeto essencial. A magnitude desta grandeza era conhecida através da célula de carga, instrumento que estava previamente ajustado e calibrado profissionalmente segundo padrões de qualidade, apresentando alta exatidão e precisão.

Por este motivo, os valores de pressão medidos pela máquina podiam ser considerados como os “verdadeiros” valores da grandeza, cumprindo-se o segundo aspeto essencial.

A interface de controlo da máquina era estabelecida através do *software* WaveMatrix™ (executado num computador fixo local). Este permitia que se programassem ensaios (sequências de tarefas) personalizados e adequados aos testes pretendidos, como por exemplo manter a pressão constante ao longo do tempo (adequado a calibrações estáticas), aumentar e/ou diminuir linearmente a pressão (adequado a calibrações dinâmicas), entre outros modos de funcionamento. Podiam-se definir quaisquer valores de pressão que se pretendessem aplicar aos sensores, até um máximo de 13,6 bar, limite bastante além do necessário. O controlo numérico da pressão exercida era executado automaticamente no decorrer dos ensaios. Garantia-se assim o terceiro aspeto essencial. No fim de cada ensaio eram produzidos resultados provenientes de duas fontes: do WaveMatrix™ e do LabView®. O primeiro exportava para ficheiros de Excel® as pressões medidas e os respetivos *timestamps* associados ao computador local. O segundo exportava para ficheiros de texto os valores da tensão produzida pelo TUNE e os respetivos *timestamps* associados ao computador portátil. As taxas de aquisição de dados eram ambas de 1000 Hz. Os relógios de ambos os computadores foram sincronizados através da rede local, de modo a que se garantisse simultaneidade e permitindo o alinhamento temporal das medições. Com este método de gravação de dados cumpria-se a quarta condição essencial.

As células dos sensores eram submetidas às pressões exercidas pela máquina ao serem colocados entre dois blocos de compressão (figura 3.5). Estes apresentavam geometria cúbica (3 cm de aresta) e eram constituídos por uma resina epoxídica, material praticamente indeformável sob as tensões aplicadas nos ensaios. As superfícies das faces de contacto estavam cobertas por uma película de borracha, com aproximadamente 1 mm de espessura. O bloco inferior possuía todas as faces planas, enquanto que o superior apresentava uma pequena curvatura cilíndrica (5,73 cm de raio) na face de contacto. Esta curvatura assentava longitudinalmente na célula do sensor, de modo a efetivamente ser exercida pressão na zona sensível e não nas bordas. A área de contacto era de 5,25 cm², valor considerado em todos os cálculos da pressão a partir da força exercida. Os blocos encaixavam na máquina através de amarras feitas em alumínio, que possuíam geometria cilíndrica com 2 cm de diâmetro. As amarras penetravam nos blocos até 2 cm de profundidade, segurando-os. Com todos estes elementos, a atuação dos sensores era feita em condições mecânicas constantes, sendo bastante semelhantes à atuação da planta do pé (devido às superfícies de borracha e curvatura da face do bloco superior). Por fim, cumpria-se o quinto aspeto essencial.

Com a garantia de utilização de equipamento adequado e cumprimento dos requisitos essenciais, desenvolveram-se então protocolos específicos para a realização dos testes. Pretendia-se que estes fornecessem informações acerca do comportamento do sistema, isto é, o modo como a tensão de resposta v variava conforme a pressão p exercida nas células sensíveis. Não foram consideradas outras grandezas de influência que pudessem alterar esta relação, uma vez que o sistema não proporcionava medições das mesmas, nem o ambiente de teste adequado. Portanto, aspetos como a temperatura ou humidade foram desconsiderados e realizaram-se todos os testes sob as condições normais do local. No entanto, devido à própria natureza das FSRs presentes nas células

sensitivas, sabia-se à partida que a relação $v[p]$ era afetada pela forma de atuação das mesmas. Apesar das condições proporcionadas serem constantes, o facto da atuação ser estática ou dinâmica poderia alterar o comportamento. Com vista a estudarem-se estes aspetos, desenvolveram-se protocolos para dois tipos de teste: (i) estático, em que a pressão era mantida constante; (ii) dinâmico, em que a pressão variava ao longo do tempo. Em conjunto, estes eventualmente permitiram que se obtivesse um conhecimento mais completo e detalhado do comportamento real do sistema, evidenciando as principais características que o definiam. Para além disso, também permitiram que se realizassem os dois tipos de calibração comuns: a estática e a dinâmica.

De uma forma geral, o procedimento de ambos os testes podia ser descrito da seguinte forma:

1. Programar a máquina para realizar o ensaio pretendido (definir parâmetros como modo de funcionamento, valores das pressões a exercer e períodos de tempo associados, entre outros);
2. Colocar a célula sensível sobre o bloco de compressão inferior, alinhada longitudinalmente em relação ao eixo de curvatura do bloco superior;
3. Iniciar a leitura dos valores de tensão e submeter a célula sensível ao ensaio;
4. No fim do ensaio, terminar a leitura dos valores de tensão e gravar os resultados.

O primeiro passo deste protocolo dependia do tipo de teste que se pretendia realizar, pois a máquina necessitava de ser programada de forma específica. A metodologia associada a este passo será detalhada nas respetivas secções de cada teste.

Todos os ensaios foram efetuados com apenas uma das células sensíveis de uma palmilha. Do ponto de vista deste trabalho, seria redundante efetuar o mesmo procedimento para as outras, pois a metodologia seria exatamente a mesma. Naturalmente que na utilização independente do TUNE, sem ser em condições experimentais, todas as células deveriam ser calibradas, pois cada uma possuía as suas próprias características de comportamento.

O tratamento dos dados provenientes de todos os ensaios (envolvendo as tarefas de observação, análise e extração de resultados) foi executado no *software* Matlab[®].



Figura 3.4: Máquina de ensaios mecânicos Instron ElectroPuls™ E1000.

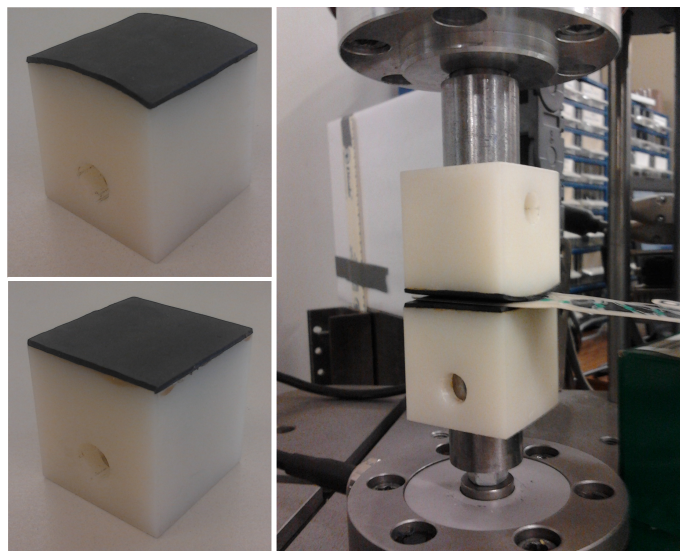


Figura 3.5: Blocos de compressão. As imagens do lado esquerdo mostram os blocos superior e inferior. A imagem do lado direito demonstra a atuação dos mesmos no sensor.

3.5 Teste Dinâmico

3.5.1 Metodologia

O principal objetivo deste teste foi o estudo da relação dinâmica entre a pressão e a tensão. Pretendiam-se extrair pontos de calibração (para eventualmente se efetuar uma calibração do tipo dinâmica) e estudar aspetos como a zona morta de funcionamento e a histerese, isto é, a influência da direção de variação de pressão na resposta. Os ensaios deste teste caracterizavam-se pela pressão exercida variar ao longo do tempo.

Programou-se a máquina para realizar uma compressão em rampa crescente, imediatamente seguida de uma descompressão em rampa decrescente (figura 3.6). As pressões exercidas variavam linearmente entre o valor mínimo $p_{\min} = 0$ bar e o valor máximo $p_{\max} = 5$ bar. O período da subida era igual ao da descida, correspondendo a $\Delta t = 25$ segundos. Realizaram-se 20 ensaios semelhantes ao descrito, com a célula sensível anterior da palmilha de tamanho S do pé esquerdo.

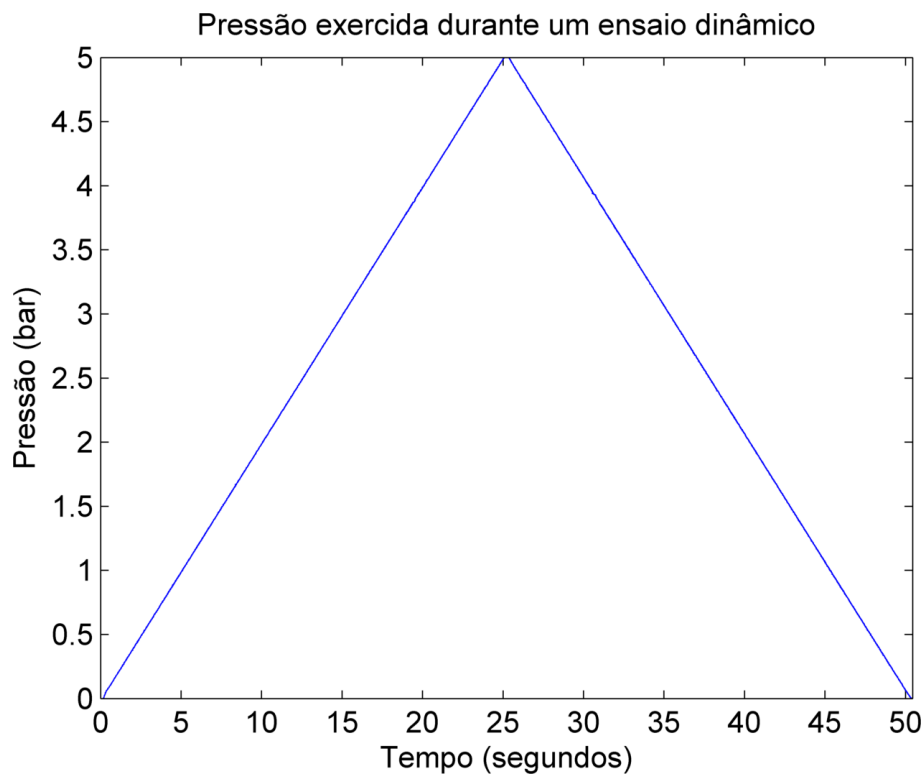


Figura 3.6: Sinal da pressão exercida durante um dos ensaios do teste dinâmico.

O intervalo de pressões entre p_{\min} e p_{\max} foi definido de forma a abranger todas as pressões de interesse, aquelas que se esperava medir com o sistema após a calibração. Apesar deste não evidenciar sensibilidade a baixas pressões (perto de zero), p_{\min} correspondia a zero para que a pressão de ativação fosse atravessada e posteriormente calculado o seu valor. Quanto a p_{\max} , este valor foi escolhido em função das limitações do sensor. Quando sujeitas a pressões superiores, as células sensíveis começavam a atingir o limiar de saturação e a resposta do sistema tornava-se

pouco sensível. Para além disto, não se esperava que pressões mais elevadas fossem atingidas durante o funcionamento normal e adequado do TUNE. Nos ensaios, o intervalo de pressões era atravessado linearmente a uma determinada velocidade, que era definida pelo período Δt . Com o valor escolhido de 25 segundos obtinha-se uma velocidade de 0,2 bar/s. Uma vez que eram adquiridas 1000 amostras por segundo, conseguiam-se obter pontos sucessivos espaçados em 0,0002 bar, o que proporcionava um grande nível de detalhe. As pressões de interesse foram atravessadas nas direções ascendente e descendente para que se estudassem os efeitos provocados por ambas as abordagens.

O tratamento de dados iniciou-se com a visualização dos sinais de pressão e tensão de cada ensaio. Verificou-se à partida que o segundo apresentava ruído de alta frequência com demasiada amplitude, algo que eventualmente poderia prejudicar a eficácia da calibração. Portanto, efetuou-se filtragem digital para atenuar este efeito indesejável. O desenvolvimento do filtro baseou-se nos seguintes critérios que deveriam ser cumpridos: (i) atenuação da magnitude das altas frequências (filtro do tipo passa-baixo), para que a amplitude do ruído fosse consideravelmente reduzida e suavizado o sinal; (ii) minimização do impacto na integridade da informação do sinal, para que não ocorressem perdas de características importantes; (iii) filtro relativamente simples e definido através de poucos parâmetros; (iv) algoritmo de fácil implementação e computacionalmente leve. Após testarem-se diferentes filtros, comparando-se o sinal filtrado com o sinal original, optou-se por implementar um filtro de mediana móvel, uma vez que apresentava o melhor desempenho. Este funcionava do seguinte modo: o valor do k -ésimo ponto do sinal, v_k , era substituído pela mediana do conjunto de valores dos pontos adjacentes, $[v_{k-n}, \dots, v_k, \dots, v_{k+n}]$, em que n determinava o tamanho da vizinhança (ou janela). Para se determinar a mediana bastava que este conjunto fosse ordenado por ordem crescente e extraído o valor central. O processo referido era executado para todos os valores de k , do início ao fim do sinal (daí se denominar de mediana móvel). Relativamente ao sinal de pressão, este não necessitou de filtragem uma vez que apresentava pouco ruído.

O passo seguinte do tratamento de dados envolveu a determinação dos pontos de calibração, isto é, os pares de valores constituídos pela pressão exercida p_i e a respetiva tensão produzida v_i . Até aqui, os dados de cada ensaio consistiam em dois sinais distintos que dependiam ambos do tempo. Mas como as medições tinham sido feitas em simultâneo e à mesma taxa de aquisição, podia-se estabelecer uma relação entre os dois, independente do tempo. Para tal, efetuou-se o alinhamento temporal dos sinais com base nos *timestamps* coincidentes. Deste cruzamento extraíram-se os valores de pressão e tensão associados aos mesmos instantes. Os pares de valores obtidos correspondiam aos pontos de calibração. Estes foram observados em gráficos de dispersão que evidenciavam a relação direta $v[p]$ ou a inversa $p[v]$.

Os pontos de calibração provenientes de cada ensaio foram ainda divididos em dois grupos: (i) os que correspondiam à primeira metade do ensaio, durante a qual se atingiam os valores de pressão na direção ascendente; (ii) os que tinham sido obtidos durante a segunda metade do ensaio, em que os valores de pressão eram atingidos na direção descendente. Pretendiam-se estudar os efeitos provocados por estas duas abordagens de variação de pressão. As diferenças entre ambas

foram quantificadas através da medida de histerese, que se calculava com a seguinte fórmula:

$$h(p) = \frac{|v_a(p) - v_d(p)|}{|v_{\max} - v_{\min}|} \times 100 \quad (3.1)$$

Os valores $v_a(p)$ e $v_d(p)$ correspondiam às tensões produzidas no mesmo ponto de pressão p , quando atingido nas direções ascendente e descendente, respetivamente. O valor v_{\max} equivalia à tensão máxima e v_{\min} à tensão mínima, atingidas durante o ensaio. O módulo da diferença entre estes valores correspondia ao alcance máximo de tensão. Portanto, a histerese $h(p)$ era representada por uma percentagem da escala inteira de *outputs* (%FSO, acrónimo de *full scale output*). Com base neste cálculo produziu-se o gráfico que mostrava a histerese em função da pressão, evidenciando os intervalos em que este efeito era mais ou menos acentuado. Foram extraídas duas medidas do gráfico: a histerese máxima (valor máximo) e a histerese média (média aritmética de todos os valores).

A zona morta de funcionamento do sistema também foi uma característica estudada. Pretendia-se determinar a pressão que delimitava essa zona de sensibilidade nula. Quando eram exercidas pressões inferiores a tal limite, o sistema não apresentava uma resposta observável, mantendo apenas a tensão de *standby*. Porém, quando o limite era atravessado durante a atuação dos sensores, ocorria uma variação abrupta na resposta. Esta característica foi facilmente detetada como um pico na derivada temporal do sinal de tensão. A pressão correspondente ao instante desse pico delimitava a zona morta. Dependendo da direção em que se atravessava o limiar, obtinham-se duas pressões distintas em cada ensaio: a de ativação, p_{act} (durante o aumento de pressão), e a de desativação, p_{deact} (durante a diminuição de pressão).

Todo o tratamento de dados até aqui descrito foi efetuado para cada um dos ensaios. Uma vez que se executaram 20 ensaios semelhantes, no final obtiveram-se 20 amostras estatísticas de todos os resultados extraídos.

3.5.2 Análise de Resultados

A curva de resposta característica do sistema foi imediatamente evidenciada ao visualizar-se o gráfico do sinal de tensão original de cada ensaio (figura 3.7). Verificou-se à partida que este não apresentava linearidade, apesar da variação de pressão ser linear. Isto demonstrava que a sensibilidade do sistema não era constante ao longo de toda a escala de pressões. A sensibilidade era nula durante os primeiros segundos do ensaio, pois o valor médio de resposta mantinha-se constante em 2,5 V. O sistema ainda se encontrava dentro da zona morta de funcionamento. Mas a partir de um certo instante ocorria uma queda de tensão, devido a ter sido atingida a pressão de ativação. Nos segundos imediatamente a seguir, o sistema apresentava uma sensibilidade muito elevada, evidenciada na rápida diminuição de tensão num curto período de tempo. Apesar da velocidade de compressão manter-se constante ao longo do ensaio, a tensão diminuía cada vez mais devagar, devido à perda gradual de sensibilidade. A partir dos 25 segundos de ensaio (omitido do gráfico da figura 3.7), em que a pressão atingia o valor máximo e começava a diminuir linearmente, a curva



Figura 3.7: Curva da tensão de resposta do sistema, produzida durante um dos ensaios do teste dinâmico. O gráfico representa o sinal de tensão ao longo de 25 segundos de aumento linear de pressão.

de resposta também apresentava uma forma semelhante. No entanto tinha aparência espelhada, pois o comportamento ocorria inversamente ao que foi descrito até agora.

Ao longo de toda a curva de resposta era possível observar-se um efeito em escada (exemplificado na figura 3.8). Durante os segundos iniciais, o primeiro degrau que se encontrava correspondia à transição da zona morta para a zona sensível. Era nesse momento que a pressão atingia um valor suficientemente grande para que pelo menos uma das FSRs da célula sensitiva fosse ativada. Esta ativação provocava uma variação abrupta na resistência total da célula, variando desde valores virtualmente infinitos até valores na ordem de 100 kOhm. O efeito resultante evidenciava-se na queda acentuada de tensão observada no primeiro degrau. Os restantes degraus eram produzidos à medida que a pressão atingia valores suficientes para ativar as outras FSRs em conjunto. Quanto mais FSRs iam sendo acionadas, cada vez menor era o seu contributo individual para a variação da resistência total da célula, resultando em degraus de tensão cada vez menores e mais suaves. As FSRs não eram todas ativadas em simultâneo devido à própria arquitetura da célula sensitiva.

Após a análise dos dados originais, efetuou-se a filtragem do sinal de tensão de cada ensaio. O filtro de mediana móvel implementado revelou ser o mais eficaz a suavizar o sinal, pois eliminava os valores extremos da vizinhança de cada ponto, associados à grande amplitude de ruído, e mantinha os valores centrais, associados à informação relevante do sinal. Simultaneamente, a distorção

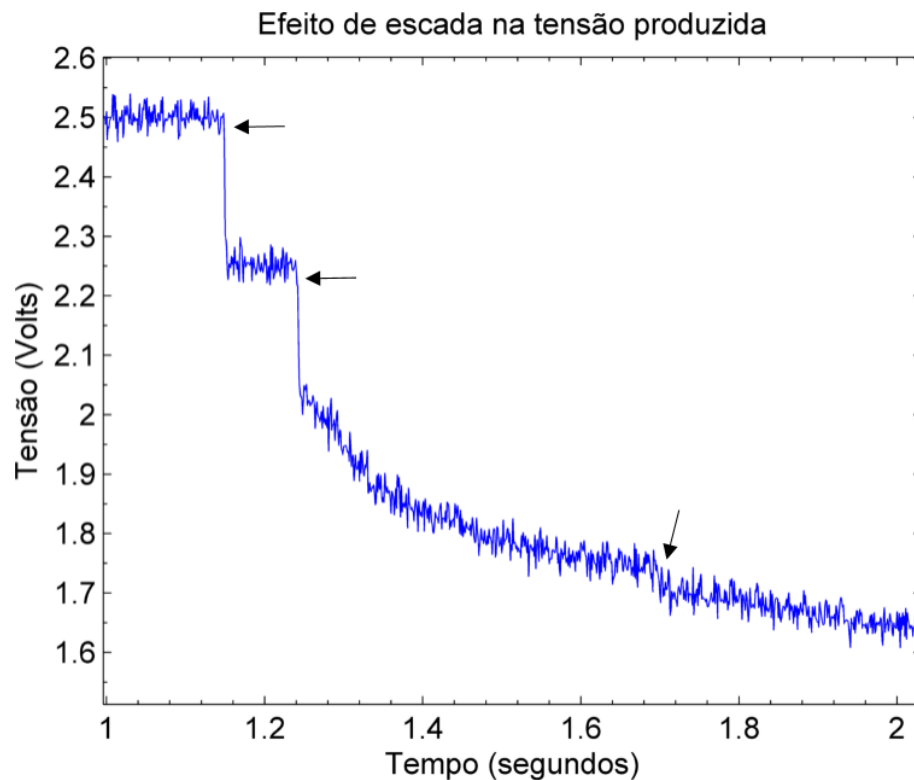


Figura 3.8: Efeito de escada no sinal de tensão, durante os primeiros segundos (fase de aumento linear de pressão) de um dos ensaios dinâmicos. As setas apontam para os locais onde ocorriam "degraus", isto é, variações abruptas de tensão.

do sinal era mínima e este preservava satisfatoriamente as suas características principais. Para além disso, o design do filtro era simples e rápido, bastando ajustar-se o parâmetro n para uma melhor adaptação. Em todas as filtrações utilizou-se uma janela de 100 ms de largura ($n = 50$), pois com valores superiores obtinha-se um sinal suavizado demais e com valores inferiores não se eliminava o ruído de forma satisfatória. A figura 3.9 demonstra a performance do filtro aplicado ao sinal de tensão.

O passo seguinte envolveu a análise dos gráficos de dispersão dos pontos de calibração provenientes de cada ensaio (figura 3.10). A sua visualização revelava informações acerca do tipo de relação existente entre as variáveis. Era crucial que se estudasse a pressão em função da tensão, ou seja, o comportamento hipoteticamente inverso do sistema, para que eventualmente se desenvolvesse o modelo de medição (no segundo passo de calibração). Portanto, a análise focou-se principalmente no gráfico da relação $p[v]$, em vez do gráfico de $v[p]$. Verificou-se que a nuvem de pontos seguia uma tendência de proporcionalidade inversa, assemelhando-se a uma curva exponencial, um polinómio ou uma hipérbole. Concluiu-se também que os pontos associados à zona morta (perto de 2,5 V) deveriam ser ignorados da relação pois não faziam parte das pressões de interesse e quebravam a tendência geral. Para além de se visualizarem os resultados de cada ensaio em separado, também se combinaram todos os pontos de calibração de todos os ensaios num único

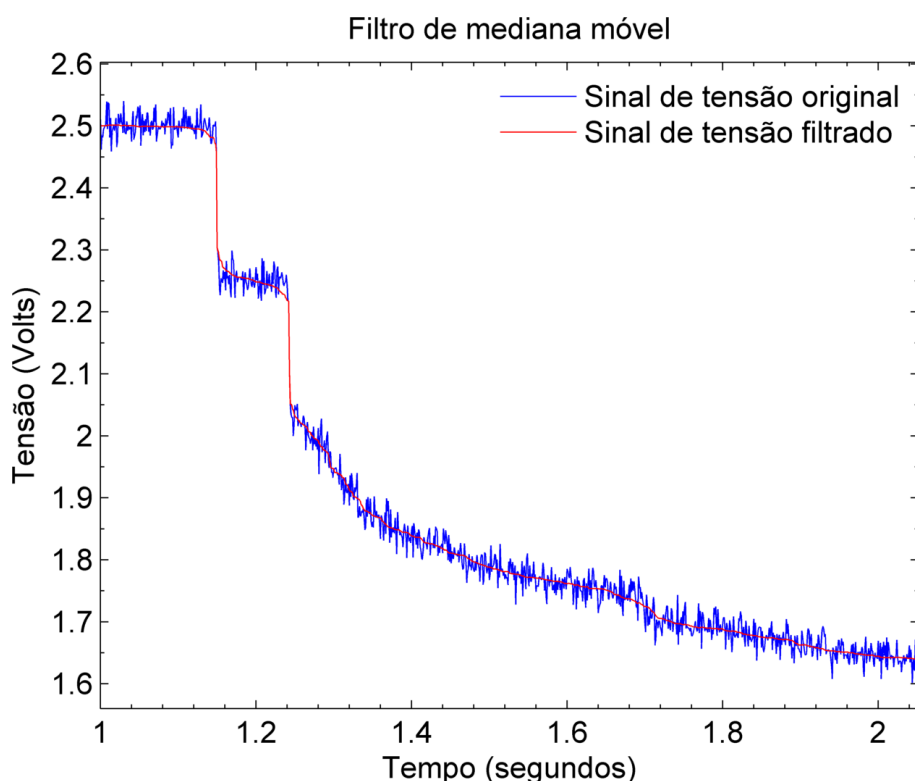


Figura 3.9: Filtro de mediana móvel (janela de 100 ms) aplicado ao sinal de tensão de um dos ensaios dinâmicos. O traço azul representa o sinal original e o traço vermelho o sinal filtrado, durante os primeiros segundos do ensaio (fase de aumento linear de pressão). É possível observar-se que o ruído ficou consideravelmente reduzido ao mesmo tempo que as informações do sinal mantiveram-se satisfatoriamente preservadas (como por exemplo a forma dos degraus e os instantes a que ocorriam).

gráfico global (figura 3.11). A nuvem de pontos obtida evidenciava a mesma relação descrita anteriormente, mas apresentava maior dispersão. Esta característica era indicadora da repetibilidade do sistema (ou variabilidade entre ensaios). Os pontos encontravam-se maioritariamente sobrepostos, demonstrando um comportamento coerente, exceto nas zonas em que ocorriam degraus. As pressões que os provocavam não correspondiam sempre aos mesmos valores, variando de ensaio para ensaio (exemplificado na figura 3.12).

Outra informação visual extraída de gráficos era a diferença entre as duas abordagens de variação de pressão. O facto dos pontos serem obtidos durante a compressão ou descompressão influenciava a forma da relação observada. Geralmente, as tensões associadas à primeira abordagem eram inferiores às tensões associadas à segunda. As diferenças mais acentuadas encontravam-se entre as zonas de degraus, evidenciadas pelos picos presentes no gráfico da histerese ao longo do intervalo de pressões (figura 3.13). Os degraus ocorriam a pressões mais baixas durante a compressão do que durante a descompressão. Por este motivo, concluiu-se que as FSRs normalmente ativavam o seu efeito a pressões inferiores àquelas a que o desativavam. A histerese presente no sistema era causada por estas características dos sensores. Para além das informações visuais, tam-

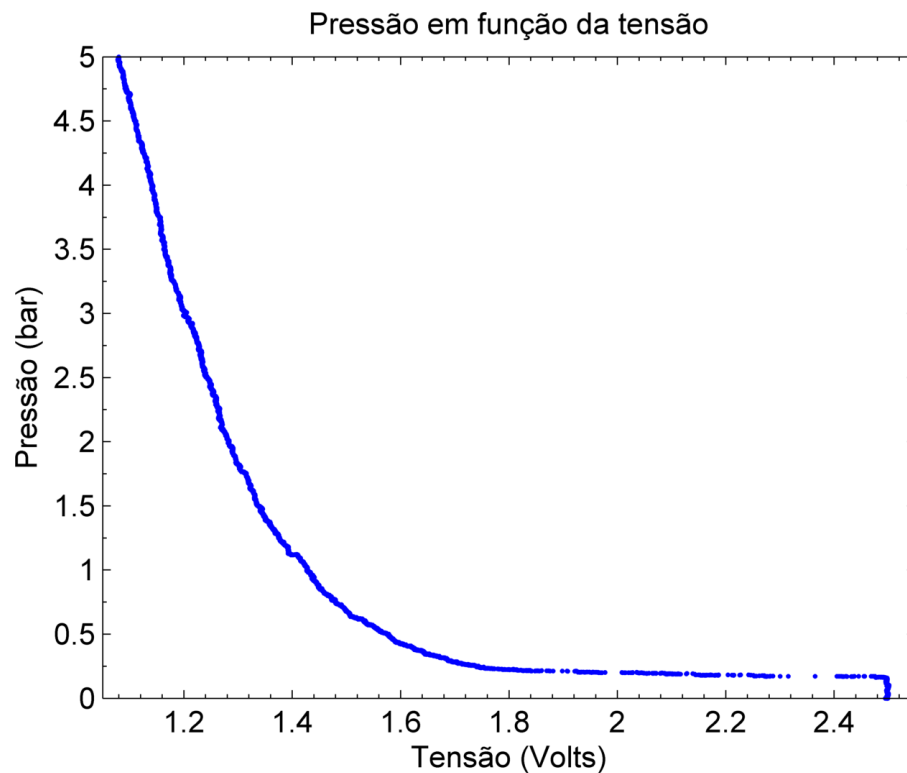


Figura 3.10: Gráfico de dispersão dos pontos de calibração associados à compressão, extraídos de um dos ensaios dinâmicos. É apresentada a relação da pressão em função da tensão. A curva evidencia a tendência da resposta hipoteticamente inversa do sistema.

bém se extraíram resultados quantitativos acerca deste fenómeno (tabela 3.1). Apesar da histerese média se apresentar relativamente baixa e ser quase negligenciável, a máxima era bastante elevada e correspondia sempre ao pico associado ao primeiro degrau. A principal causa deste pico era a diferença entre a pressão de ativação e a de desativação, cujos resultados se encontram na tabela 3.2. A primeira tinha tendência para ser menor que a segunda, devido às características já descritas do comportamento das FSRs.

Tabela 3.1: Histerese máxima e média da célula sensitiva. Os valores representam média \pm desvio-padrão, obtidos a partir de $n = 20$ amostras.

Histerese máxima (%FSO)	Histerese média (%FSO)
$43,93 \pm 4,63$	$0,93 \pm 0,07$

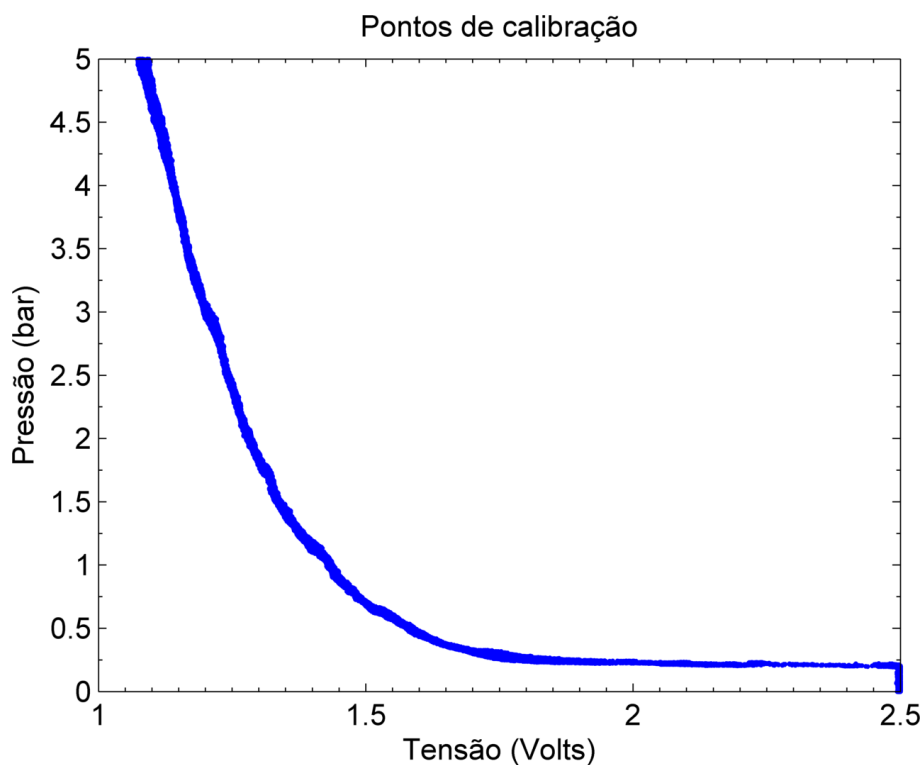


Figura 3.11: Gráfico que contém a combinação de todos os pontos de calibração associados à compressão extraídos de 20 ensaios dinâmicos. A sua sobreposição forma uma nuvem de pontos que evidencia a tendência global da resposta hipoteticamente inversa do sistema. A variabilidade entre os ensaios traduz-se na dispersão da nuvem.

Tabela 3.2: Pressões de ativação e desativação da célula sensível. Os valores representam média \pm desvio-padrão, obtidos a partir de $n = 20$ amostras. A pressão de ativação é estatisticamente diferente da de desativação ($p < 0,01$).

Pressão de ativação (bar)	Pressão de desativação (bar)
$0,208 \pm 0,005$	$0,236 \pm 0,005$

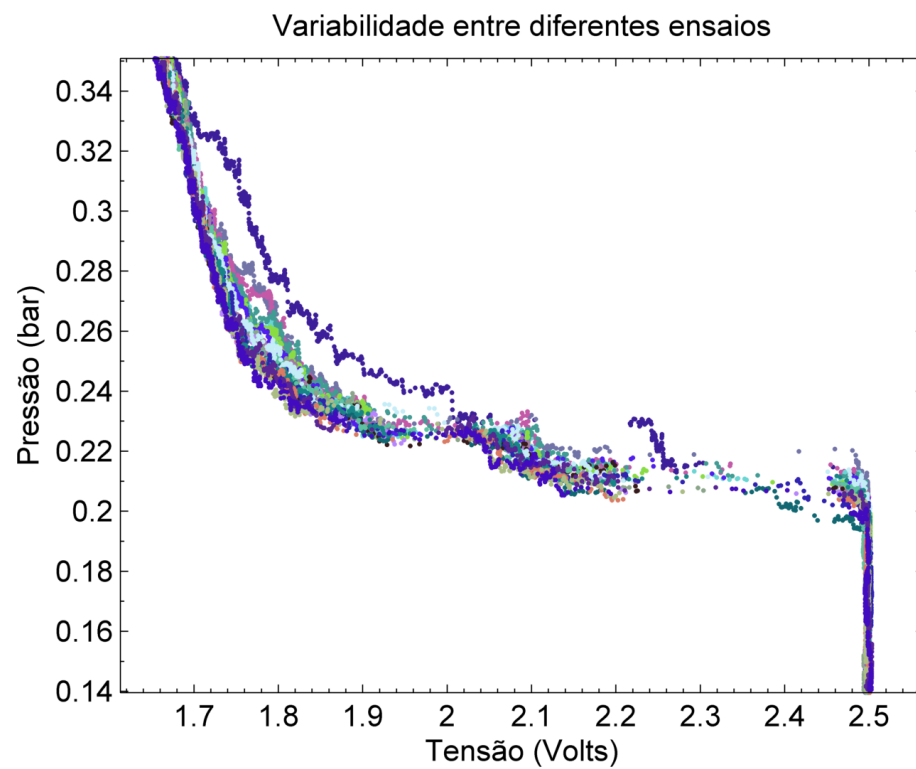


Figura 3.12: Variabilidade de resposta do sensor. O gráfico representa os pontos de calibração associados à compressão obtidos em todos os ensaios do teste dinâmico, evidenciando as diferenças entre os mesmos. As cores dos pontos distinguem cada um dos 20 ensaios. As pressões em que ocorriam os degraus não eram sempre as mesmas, pois os pontos de diferentes ensaios não se encontravam sobrepostos.

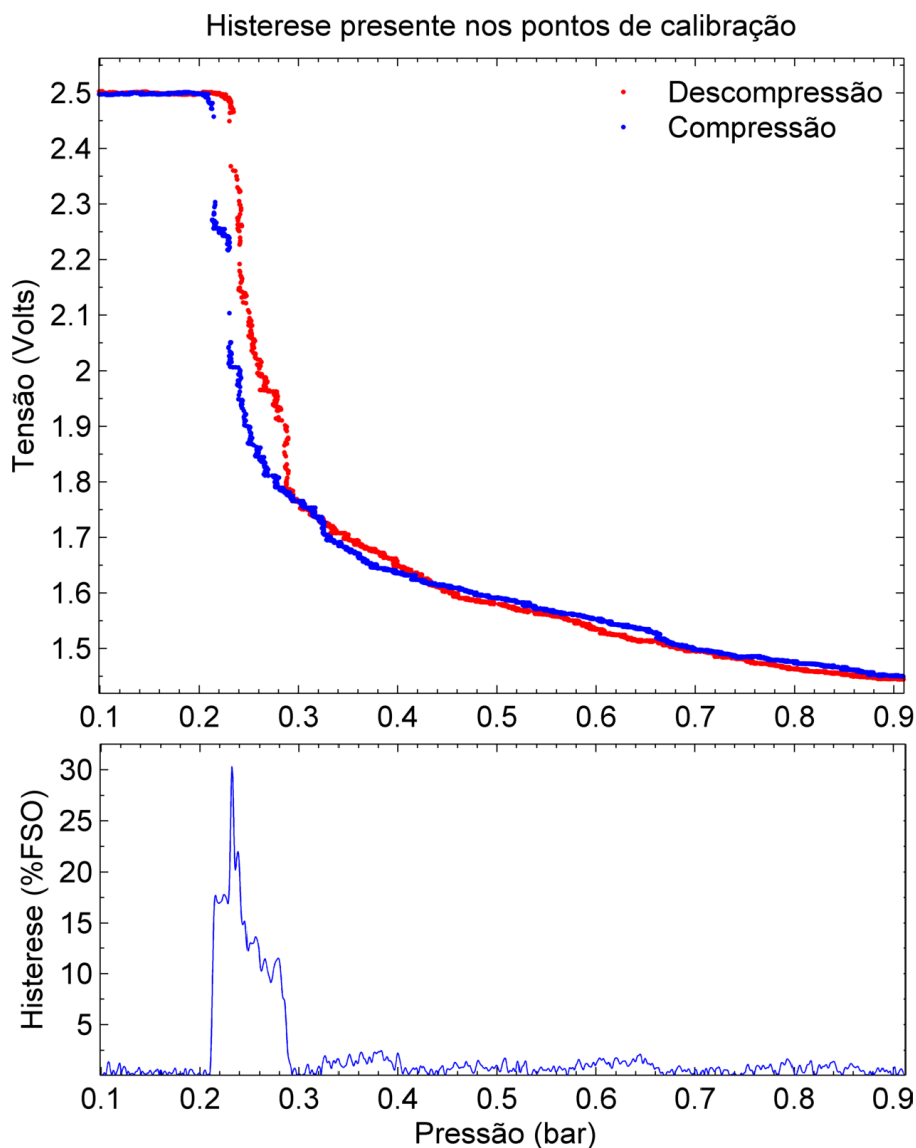


Figura 3.13: Gráficos da histerese presente nos pontos de calibração, obtidos a partir de um dos ensaios do teste dinâmico. O gráfico superior representa a tensão em função da pressão, durante a compressão (azul) e descompressão (vermelho). O gráfico inferior representa a histerese calculada em cada ponto do gráfico superior. São evidenciados picos de histerese principalmente nas zonas entre degraus.

3.6 Teste Estático

3.6.1 Metodologia

O principal objetivo deste teste era o estudo da relação estática entre a pressão e a tensão. Pretendiam-se extrair pontos de calibração (para eventualmente se efetuar uma calibração do tipo estática) e estudar o *drift* do sistema, isto é, a tendência para o sinal de resposta se desviar gradualmente quando a pressão se mantém constante durante longos períodos de tempo.

Programou-se a máquina para exercer um determinado valor de pressão constante p_i , durante o período de tempo $\Delta t = 120$ segundos. Consideraram-se nove valores de pressão distintos (tabela 3.3), que no final corresponderiam a nove pontos de calibração obtidos de forma estática. A máquina executava os ensaios sempre da mesma forma: a pressão exercida iniciava em zero e aumentava linearmente (a uma velocidade de 0,2 bar/s) até atingir o valor definido, acabando por permanecer constante durante o período Δt estabelecido. Para este teste realizou-se 1 ensaio por cada valor de pressão p_i , com a célula sensitiva anterior da palmilha de tamanho S do pé esquerdo, totalizando 9 ensaios.

Tabela 3.3: Pressões exercidas nos ensaios do teste estático.

p_i	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9
Pressão (bar)	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,4	5,0

O primeiro valor, p_1 , encontrava-se imediatamente acima do limiar de ativação do sensor. Abaixo deste, a pressão não era suficiente para ser produzida uma resposta detetável. A escolha de p_1 foi feita por tentativa e erro, variando-se pouco a pouco a pressão exercida até se encontrar um valor que produzisse uma resposta observável e estável. Enquanto que p_1 correspondia ao limite mínimo do intervalo de pressões de interesse, p_9 foi escolhido para delimitar o limite máximo. Este era equivalente à pressão p_{max} do teste dinâmico, tendo sido escolhido segundo as mesmas razões apontadas anteriormente (ver secção 3.5). Tendo o intervalo de interesse definido, escolheram-se então os restantes valores, desde p_2 a p_8 . Em conjunto, estes deveriam revelar e caraterizar o melhor possível a tendência global da tensão em função da pressão. O espaçamento entre eles era um fator crucial para que não se saltassem caraterísticas importantes presentes em valores intermédios. Como o sensor era bastante sensível às pressões baixas, escolheu-se p_2 perto de p_1 . A partir daí, a sensibilidade começava a diminuir consideravelmente. Nesta zona escolheram-se os pontos de p_3 até p_7 igualmente espaçados entre si. Como a partir de x_7 o sistema tornava-se menos sensível, os pontos p_8 e p_9 já correspondiam a incrementos de pressão bastante mais largos. Quanto ao tempo de pressão constante aplicado, Δt , este era bastante prolongado para que efeitos de *drift* fossem observáveis nas medições e pudessem ser estudados posteriormente.

O tratamento de dados iniciou-se com a observação do gráfico da pressão exercida ao longo do tempo, para cada ensaio. Verificou-se que quando o valor estabelecido era atingido, ocorriam pequenas oscilações na resposta da máquina. Determinou-se então o *settling time*, t_i , a partir do qual as oscilações permaneciam dentro de um intervalo de 0,01 bar em torno de p_i . Desde

t_i até ao instante final t_f , a média aritmética dos valores de pressão correspondia exatamente a p_i . O respetivo desvio-padrão indicava que os valores estavam sujeitos a flutuações de baixa amplitude causadas por ruído, mas que eram negligenciáveis. Por este motivo, a pressão podia ser considerada constante ao longo do intervalo de t_i até t_f .

O passo seguinte do tratamento de dados envolveu a filtragem do sinal de tensão e o seu alinhamento temporal com o sinal de pressão, utilizando-se a mesma metodologia do teste dinâmico (ver secção 3.5). A partir daí isolaram-se as tensões de interesse, aquelas pertencentes ao intervalo desde t_i até t_f . Pretendia-se extrair um valor v_i que fosse representativo de toda a resposta do sistema ao longo desse intervalo. Para tal, calculou-se a média aritmética de todos os valores de tensão pertencentes ao mesmo. Como a taxa de aquisição era de 1000 Hz, 120 segundos equivaliam a 120000 amostras de tensão produzidas sob a pressão p_i . No final, obtiveram-se os pares de valores $[p_i, v_i]$, que formavam os pontos de calibração. Estes foram observados num gráfico da pressão em função da tensão.

O *drift* também foi uma característica estudada neste teste. Pretendia-se estudar o comportamento do sistema sob pressão constante e prolongada. Para tal, observou-se o gráfico da tensão produzida em cada ensaio, ao longo do intervalo desde t_i até t_f . Em cada ponto do gráfico foi calculada a percentagem de desvio do sinal em relação ao instante inicial. Como medida quantitativa do *drift*, calculou-se a taxa média de variação de tensão, que correspondia ao valor médio da derivada temporal do sinal.

3.6.2 Análise de Resultados

Tabela 3.4: Pontos de calibração obtidos de forma estática. Os valores representam média \pm desvio-padrão, obtidos a partir de $n = 120000$ amostras.

Ponto de calibração i	Pressão p_i (bar)	Tensão v_i (Volts)
1	$0,200 \pm 0,001$	$2,000 \pm 0,006$
2	$0,400 \pm 0,001$	$1,613 \pm 0,006$
3	$0,800 \pm 0,001$	$1,459 \pm 0,004$
4	$1,200 \pm 0,001$	$1,373 \pm 0,003$
5	$1,600 \pm 0,001$	$1,317 \pm 0,004$
6	$2,000 \pm 0,001$	$1,273 \pm 0,003$
7	$2,400 \pm 0,001$	$1,242 \pm 0,003$
8	$3,400 \pm 0,002$	$1,165 \pm 0,003$
9	$5,000 \pm 0,002$	$1,090 \pm 0,003$

O teste realizado permitiu que se extraíssem nove pontos de calibração (apresentados na tabela 3.4). Os valores de cada ponto correspondiam a valores médios em conjunto com os respetivos desvios-padrão. As pressões exercidas possuíam desvios-padrão bastante reduzidos, indicando que as mesmas podiam ser consideradas constantes em todos os ensaios (variações negligenciáveis). Assim assegurou-se que os pontos eram realmente provenientes de condições estáticas. Por este motivo, sabia-se à partida que qualquer variação encontrada na tensão de reposta não poderia

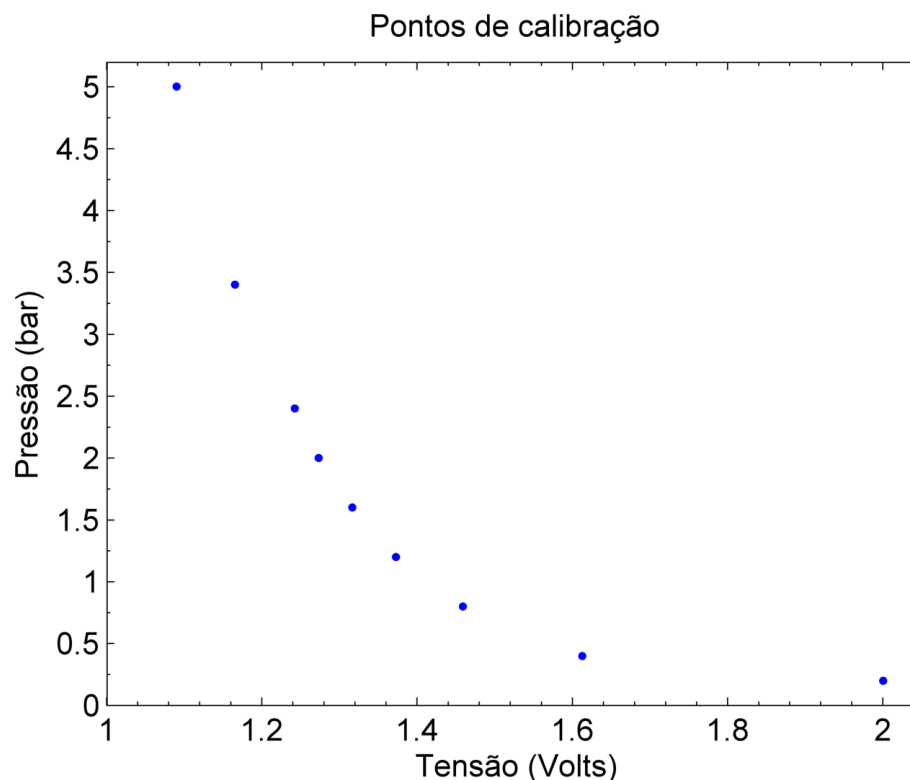


Figura 3.14: Gráfico que representa a relação da pressão em função da tensão, contendo os pontos de calibração extraídos do teste estático. Os pontos correspondem aos valores médios encontrados na tabela 3.4. Os respectivos desvios-padrão foram omitidos devido a serem inobserváveis à escala utilizada na representação.

ser causada pela pressão exercida. Relativamente às tensões, estas possuíam desvios-padrão consideráveis, indicando alguma dispersão na resposta. Uma possível causa deste efeito era o ruído do sinal, mas como se tinha efetuado filtragem era provável que não fosse o principal motivo. As observações sugeriam que a principal causa era a variação gradual da tensão ao longo do tempo, ou seja, o *drift*. Apesar da dispersão encontrada, os valores de tensão obtidos eram na mesma os que melhor representavam as respostas do sistema.

Os pontos de calibração também foram visualizados num gráfico de dispersão (figura 3.14), evidenciando melhor a relação entre a pressão e a tensão. A tendência observada era semelhante à que se tinha encontrado no teste dinâmico. Novamente, o conjunto de pontos seguia uma relação exponencial, polinomial ou hiperbólica. No entanto, certas características não estavam presentes nos resultados deste teste. A relação não aparentava possuir o efeito em escada, pois não se distinguia degraus. Estes aspetos da resposta do sistema simplesmente não eram evidenciados devido à baixa densidade de pontos de pressão, típica de um teste de calibração estático. Apesar disso, a globalidade da relação encontrava-se eficazmente caracterizada pelos pontos obtidos.

A pressão exercida de forma estática produzia efeitos notáveis nos gráficos do sinal de tensão (exemplificado na figura 3.15). Observava-se sempre a tendência para a tensão diminuir ao longo do tempo, apesar da pressão permanecer constante em todos os ensaios. A queda de tensão ocorria

Tabela 3.5: Taxa média de *drift* da célula sensível. Os valores representam média \pm desvio-padrão, obtidos a partir de $n = 9$ amostras. As unidades de medida encontram-se em miliVolts por minuto, pois eram as mais apropriadas para representar as pequenas variações de tensão ocorridas ao longo de intervalos de tempo tão grandes. A taxa corresponde a um valor negativo uma vez que a tendência da tensão era diminuir.

Drift (mV/min)
$-16,6 \pm 3,5$

de forma mais acentuada durante o período inicial (até cerca de 20 segundos). A partir daí estabilizava e mantinha uma determinada velocidade de queda, seguindo uma tendência praticamente linear. A taxa média de *drift* calculada encontra-se na tabela 3.5.

O efeito de *drift* devia-se ao fenómeno de acomodação dos sensores. Apesar da atuação da célula sensível permanecer constante durante os ensaios, a deformação da sua superfície continuava a ocorrer devido à acomodação elástica dos materiais. Consequentemente, as FSRs continuavam a diminuir a sua resistência, provocando a queda gradual de tensão observada. Como esta variação era constante, quanto maior fosse o tempo do ensaio, maior seria o desvio atingido pelo sinal (em relação ao valor inicial). Este comportamento afetava o processo de extração de pontos de calibração, particularmente no passo em que se pretendia obter um único valor de tensão representativo de todo o sinal. Neste caso, em que se escolheu o valor médio do sinal, este tornava-se menor à medida que o tempo do ensaio aumentava. Consequentemente, os pontos de calibração sofriam um deslocamento para valores de tensão mais baixos. O efeito de *drift* e a sua possível influência nos pontos de calibração resultantes eram problemas típicos de um teste estático.

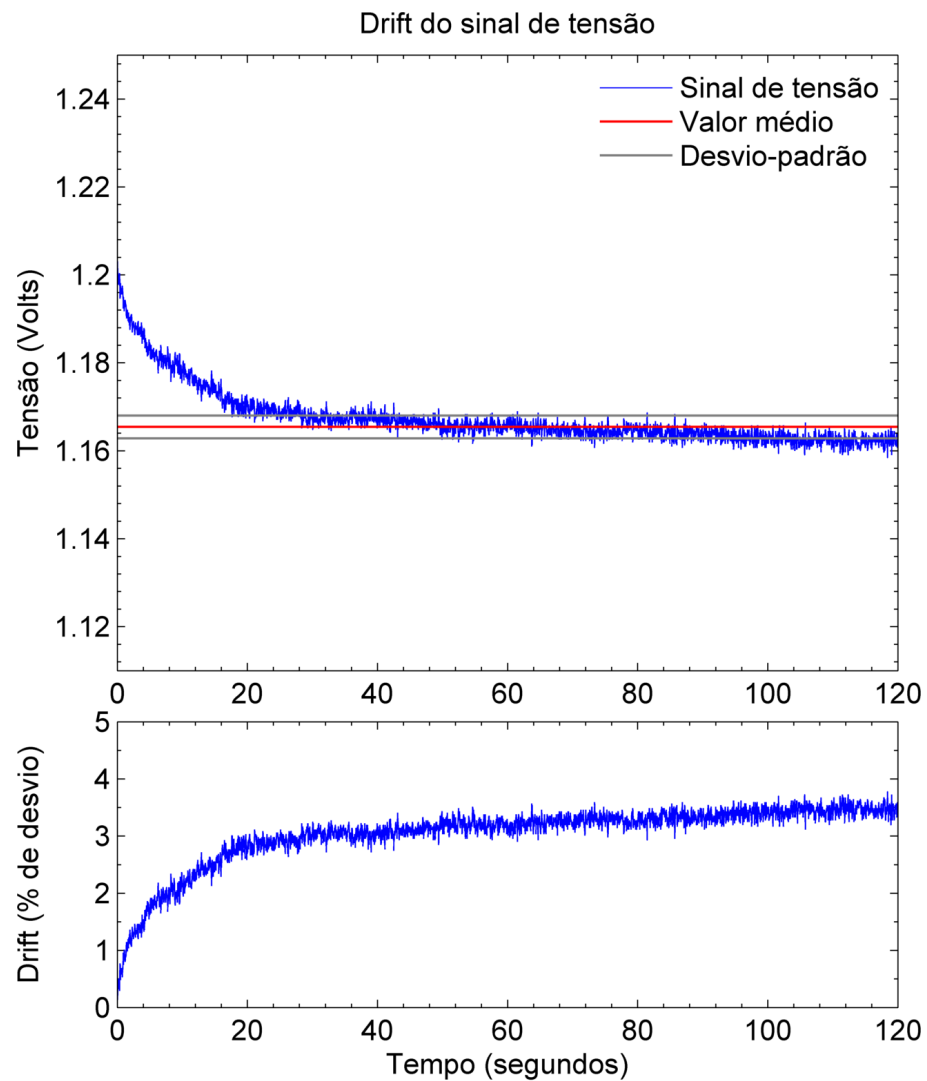


Figura 3.15: Gráfico superior: sinal de tensão (azul) produzido num dos ensaios, durante 120 s de pressão constante (3,4 bar). As linhas vermelha e cinzenta representam o valor médio e desvio-padrão do sinal, respetivamente. Estes foram calculados para se obter a tensão do ponto de calibração 8 (encontrado na tabela 3.4). Gráfico inferior: percentagem de desvio da tensão ao longo do tempo, em relação ao valor do instante inicial.

3.7 Considerações Finais do Capítulo

O sistema de medição utilizado neste trabalho era constituído por um sensor de pressão resistivo (baseado em FSRs), o dispositivo TUNE, uma placa de aquisição de sinal e um computador portátil. Inicialmente, o sistema encontrava-se descalibrado. Por este motivo, este foi sujeito a um procedimento de calibração, para que no final pudesse produzir medições de pressão.

Os testes experimentais de calibração foram planeados de modo a que se garantissem as condições essenciais: controlo da pressão exercida, medição antecipada da mesma e gravação dos resultados. O principal equipamento utilizado nos testes era uma máquina de ensaios mecânicos. Esta garantia a fiabilidade e as condições necessárias para uma calibração bem sucedida. A atuação dos sensores ocorria com dois blocos de compressão, que simulavam eficazmente a atuação do pé.

Os testes estático e dinâmico permitiram que se ficasse a conhecer o comportamento do sistema. Verificou-se que este não apresentava sensibilidade sob baixas pressões. Apenas acima da pressão de ativação é que evidenciava resposta. A partir daí, a sensibilidade tendia a diminuir com o aumento de pressão. A curva de resposta apresentava um formato semelhante a uma função exponencial, polinomial ou hiperbólica. Para além disso, também continha um característico efeito de escada, causado pelo próprio funcionamento das FSRs. Mesmo sob condições constantes de atuação dos sensores, a resposta apresentava uma certa incoerência e variabilidade. Os efeitos de *drift* e histerese também tinham uma influência considerável.

Capítulo 4

2º Passo da Calibração de um Sistema Medidor de Pressão Plantar

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o segundo passo da calibração que foi executada a um sistema medidor de pressão plantar, bem como o teste de verificação da mesma. A partir dos dados quantitativos e qualitativos obtidos nos testes realizados anteriormente (capítulo 3), desenvolveu-se um modelo de medição (secção 4.3). A partir desse momento, o sistema podia ser considerado calibrado. Contudo, para que os resultados de medição fossem produzidos diretamente pelo sistema, ainda se implementou um algoritmo do modelo (secção 4.4). Por fim, também se realizou um teste de verificação, no qual se avaliou o desempenho do sistema (secção 4.5). A secção 4.6 apresenta um breve resumo de todo o capítulo e as principais conclusões retiradas.

4.2 Objetivos

Considerando o objetivo geral do trabalho (secção 3.2 do capítulo 3), esta fase foi a continuação do passo anterior e envolveu certos objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo de medição a partir de várias metodologias distintas;
- Avaliar o desempenho do sistema após a calibração;
- Determinar o método de calibração mais eficaz para o sistema.

4.3 Desenvolvimento do Modelo de Medição

4.3.1 Metodologia

A segunda fase da operação de calibração consistiu no desenvolvimento do modelo de medição, envolvendo a modelação matemática do comportamento hipoteticamente inverso do sistema.

Pretendia-se que o modelo produzisse estimativas da pressão exercida a partir da tensão de resposta produzida, pois apenas assim é que se conseguiriam efetuar medições. O seu desenvolvimento apoiou-se nos dados qualitativos e quantitativos obtidos nos testes dinâmico e estático.

A estrutura base do modelo correspondia a uma função $M(v, c_1, \dots, c_m)$, dependente da tensão de resposta v (variável) e de m parâmetros de ajuste c_j (constantes) ($j = 1, \dots, m$), que produzia uma estimativa \hat{p} da pressão exercida nos sensores:

$$\hat{p} = M(v, c_1, \dots, c_m) \quad (4.1)$$

Optou-se por uma simples função de uma variável pelas seguintes razões: (i) era principalmente através de v que as informações acerca de p se tornavam disponíveis; (ii) o sistema só tinha acesso a medições de v e não de outras grandezas; (iii) não existiam dados suficientes que permitissem compreender a influência de outras grandezas no sistema. Portanto, assumiu-se que os efeitos provocados por estas não afetavam o comportamento do sistema e, por essa razão, o modelo não necessitava de incluir mais variáveis para além da tensão.

A escolha adequada da função $M(v, c_1, \dots, c_m)$ era essencial para que o modelo refletisse corretamente a tendência observada nos gráficos de dispersão dos pontos de calibração. De acordo com as observações realizadas anteriormente nos testes experimentais, os tipos de funções que aparentavam adequar-se e encaixar-se nos dados eram os seguintes: exponencial, polinomial e hiperbólica. Para efeitos de comparação e eventual determinação da melhor função, desenvolveram-se modelos com cada uma das três. Os formatos gerais que as funções apresentavam eram os seguintes:

1. Exponencial, com dois parâmetros de ajuste c_1 e c_2 :

$$\hat{p} = c_1 e^{c_2 v} \quad (4.2)$$

2. Polinomial de 4º grau, com cinco parâmetros de ajuste c_1, c_2, c_3, c_4 e c_5 :

$$\hat{p} = c_1 v^4 + c_2 v^3 + c_3 v^2 + c_4 v + c_5 \quad (4.3)$$

3. Hiperbólica, com quatro parâmetros de ajuste c_1, c_2, c_3 e c_4 :

$$\hat{p} = \frac{c_1}{v^{c_2} + c_3} + c_4 \quad (4.4)$$

Estas funções conseguiam descrever a tendência da pressão ao longo de todo o intervalo de tensões. Outra abordagem que foi executada consistiu na divisão deste intervalo em várias secções e na atribuição de uma função a cada uma delas, que em conjunto formavam uma função segmentada (*spline*). Para este caso, considerou-se a seguinte função:

4. *Spline* de funções lineares, com dois parâmetros de ajuste c_{1i} e c_{2i} associados à função de cada secção i , delimitada por v_i e v_{i+1} :

$$\hat{p} = c_{1i} + c_{2i}v \quad \text{se} \quad v_i \leq v < v_{i+1} \quad (4.5)$$

O passo seguinte do desenvolvimento do modelo consistiu no cálculo dos parâmetros c_j , de modo a ajustarem-se as funções aos pontos de calibração $[p_i, v_i]$ e obterem-se modelos do tipo $\hat{p} = M(v)$. Todo o procedimento foi executado em Matlab®. Utilizaram-se dois métodos distintos neste passo:

- (a) Método de interpolação, no qual se calculavam os parâmetros de modo a que a função atravessasse os pontos de calibração obtidos de forma estática (apresentados anteriormente na figura 3.14 da secção 3.6). A metodologia envolvida dependia do tipo de função:

1. No caso da função exponencial, eram necessários apenas dois pontos de calibração para que os seus parâmetros fossem calculados, utilizando-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} c_1 = \exp \left[\ln(p_1) - \frac{\ln(p_2) - \ln(p_1)}{v_2 - v_1} v_1 \right] \\ c_2 = \frac{\ln(p_2) - \ln(p_1)}{v_2 - v_1} \end{cases} \quad (4.6)$$

Os pontos que eventualmente foram utilizados correspondiam ao 2 e 7.

2. No caso da função polinomial, o cálculo dos seus parâmetros envolvia a resolução do seguinte sistema de equações lineares em formato matricial, que utilizava cinco pontos de calibração:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_1)^4 & (v_1)^3 & (v_1)^2 & v_1 & 1 \\ (v_2)^4 & (v_2)^3 & (v_2)^2 & v_2 & 1 \\ (v_3)^4 & (v_3)^3 & (v_3)^2 & v_3 & 1 \\ (v_4)^4 & (v_4)^3 & (v_4)^2 & v_4 & 1 \\ (v_5)^4 & (v_5)^3 & (v_5)^2 & v_5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{P} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{C} \quad (4.7)$$

Os pontos que eventualmente foram utilizados correspondiam ao 1, 2, 4, 7 e 9. Ao multiplicar-se a matriz inversa de \mathbf{V} pelo vetor \mathbf{P} , determinava-se o vetor de parâmetros \mathbf{C} que solucionava o sistema:

$$\mathbf{C} = \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{P}$$

3. No caso da função hiperbólica, era necessário solucionar-se o seguinte sistema de

equações não lineares, que utilizava quatro pontos de calibração:

$$\begin{cases} \frac{c_1}{v_1^{c_2} + c_3} + c_4 - p_1 = 0 \\ \frac{c_1}{v_2^{c_2} + c_3} + c_4 - p_2 = 0 \\ \frac{c_1}{v_3^{c_2} + c_3} + c_4 - p_3 = 0 \\ \frac{c_1}{v_4^{c_2} + c_3} + c_4 - p_4 = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Eventualmente utilizaram-se os pontos 1, 2, 7 e 9. Para se determinarem os parâmetros, utilizou-se um algoritmo iterativo baseado no método de Newton de resolução de sistemas de equações não lineares. As iterações só terminavam quando se atingia o seguinte critério:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^4 \left[\frac{c_1}{v_i^{c_2} + c_3} + c_4 - p_i \right]^2} \leq 1 \times 10^{-12} \quad (4.9)$$

Isto significava que quando todas as equações do sistema equivalessem virtualmente a zero, então o erro dos parâmetros aproximados tornava-se negligenciável.

- 4 No caso da *spline* linear, os nós que delimitavam as secções correspondiam aos nove pontos de calibração. A função era definida por interpolações lineares de nó em nó:

$$\hat{p} = \begin{cases} p_1 + \frac{v - v_1}{v_2 - v_1}(p_2 - p_1) & \text{se } v_1 \leq v < v_2 \\ p_2 + \frac{v - v_2}{v_3 - v_2}(p_3 - p_2) & \text{se } v_2 \leq v < v_3 \\ \vdots & \\ p_8 + \frac{v - v_8}{v_9 - v_8}(p_9 - p_8) & \text{se } v_8 \leq v < v_9 \end{cases} \quad (4.10)$$

A função de cada secção podia ser reescrita em termos de parâmetros, através da seguinte relação:

$$c_{1i} = p_i - c_{2i}v_i \quad (4.11)$$

$$c_{2i} = \frac{p_{i+1} - p_i}{v_{i+1} - v_i} \quad (4.12)$$

No entanto, podia-se evitar o cálculo dos parâmetros e, por questões práticas, era preferível manter-se uma *look-up table* com os pontos de calibração.

- (b) Método de regressão, no qual se calculavam os parâmetros que melhor ajustavam a função à nuvem de pontos de calibração (observada no gráfico de dispersão global de todos os ensaios dinâmicos). Uma vez que tinham sido executadas duas abordagens de variação de

pressão (compressão e descompressão), calcularam-se parâmetros para ambas as situações. A metodologia envolvida consistia na aplicação do método dos mínimos quadrados a cada uma das funções, cujo objetivo era a minimização do erro quadrático total. Este problema traduzia-se nos seguintes sistemas de equações:

1. No caso da função exponencial:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial c_1} \left(\sum_i [p_i - c_1 e^{c_2 v_i}]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_2} \left(\sum_i [p_i - c_1 e^{c_2 v_i}]^2 \right) = 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

2. No caso da função polinomial:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial c_1} \left(\sum_i [p_i - c_1 v_i^4 + c_2 v_i^3 + c_3 v_i^2 + c_4 v_i + c_5]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_2} \left(\sum_i [p_i - c_1 v_i^4 + c_2 v_i^3 + c_3 v_i^2 + c_4 v_i + c_5]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_3} \left(\sum_i [p_i - c_1 v_i^4 + c_2 v_i^3 + c_3 v_i^2 + c_4 v_i + c_5]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_4} \left(\sum_i [p_i - c_1 v_i^4 + c_2 v_i^3 + c_3 v_i^2 + c_4 v_i + c_5]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_5} \left(\sum_i [p_i - c_1 v_i^4 + c_2 v_i^3 + c_3 v_i^2 + c_4 v_i + c_5]^2 \right) = 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

3. No caso da função hiperbólica:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial c_1} \left(\sum_i \left[p_i - \frac{c_1}{v_i^{c_2} + c_3} + c_4 \right]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_2} \left(\sum_i \left[p_i - \frac{c_1}{v_i^{c_2} + c_3} + c_4 \right]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_3} \left(\sum_i \left[p_i - \frac{c_1}{v_i^{c_2} + c_3} + c_4 \right]^2 \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c_4} \left(\sum_i \left[p_i - \frac{c_1}{v_i^{c_2} + c_3} + c_4 \right]^2 \right) = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

A determinação dos parâmetros das funções envolvia a resolução destes três sistemas de equações não lineares. Para tal, utilizou-se novamente um algoritmo iterativo baseado no

método de Newton, com um critério de paragem semelhante:

$$\sqrt{\sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial}{\partial c_j} \left(\sum_i [p_i - M(v_i, c_1, \dots, c_m)]^2 \right) \right]^2} \leq 1 \times 10^{-12} \quad (4.16)$$

Deste modo, os parâmetros resultantes possuíam erros de aproximação negligenciáveis.

Após a obtenção dos parâmetros com ambos os métodos, visualizaram-se os gráficos das curvas produzidas pelas funções, para se verificar se as mesmas seguiam corretamente a tendência do comportamento do sistema.

Para além da estrutura base do modelo, também se desenvolveram métodos de compensação de *drift* e histerese, que funcionavam em conjunto com a função de medição. No primeiro, pretendia-se que a variação lenta da tensão sob pressão constante fosse eliminada. A principal dificuldade era distinguir se a variação detetada devia-se ao efeito de *drift* ou se a pressão exercida estava realmente a variar. Porém, como se sabia previamente a taxa de *drift* do sistema, conseguia-se efetuar tal distinção. Quando a derivada temporal do sinal de tensão apresentava valores abaixo dessa taxa, podia-se concluir que o sistema estava a sofrer *drift*. Para se eliminar o seu efeito, o último valor de tensão que se sabia não estar afetado por *drift* era mantido constante ao longo do tempo, até ao momento em que a derivada voltava a ficar acima da taxa. A partir daí, o sinal de tensão prosseguia normalmente.

No método de compensação de histerese, pretendia-se minimizar a diferença entre as respostas do sistema sob compressão e descompressão. Isto implicava que se determinasse antecipadamente a direção de variação da pressão, apenas analisando o sinal de tensão. Para tal, aplicou-se uma função de janela móvel ao longo do sinal. Essa função percorria todos os valores de tensão v_k da janela, um a um desde $k = 1$ até $k = n$ (sendo n o tamanho da janela). Se $v_k < v_1$, o *output* f da função decrementava 1 unidade. Se $v_k > v_1$, f incrementava 1 unidade. No final, se o valor f se tornasse negativo, significava que o sinal da janela correspondente encontrava-se maioritariamente a decrescer. Por outro lado, se f fosse positivo, podia-se concluir o inverso. Como se sabia anteriormente que o sistema respondia ao aumento de pressão com a diminuição da tensão, chegava-se à conclusão que estava a ocorrer uma compressão nos pontos em que $f < 0$ e uma descompressão quando $f > 0$. Para além disso, quanto maior fosse $|f|$, maior seria a probabilidade da conclusão tirada estar correta. Para se refletir esta probabilidade, os valores de f de todos os instantes t foram mapeados linearmente entre 0 e 1 (correspondendo aos valores mínimo e máximo encontrados, respetivamente). Determinava-se assim a função $w[t]$, que indicava a probabilidade da pressão estar a aumentar no instante t . Como forma de minimizar a histerese dos resultados de medição, conjugaram-se os conjuntos de parâmetros de compressão C_c e de descompressão C_d , formando-se novas funções que apresentavam o seguinte formato:

$$\hat{p}[t] = w[t]M(v[t], C_c) + (1 - w[t])M(v[t], C_d) \quad (4.17)$$

Deste modo, as funções utilizavam os parâmetros de compressão ou descompressão conforme a

probabilidade de serem adequados à situação. Os seus contributos para o cálculo dos resultados de medição equilibravam-se continuamente.

4.3.2 Análise de Resultados

As funções de medição escolhidas variavam tanto em complexidade como no número de parâmetros. Podia-se considerar a *spline* a menos complexa de todas, pois cada segmento era modelado por uma simples função linear e os seus parâmetros correspondiam diretamente aos pontos de calibração. A que necessitava de mais parâmetros era a polinomial (devido ao seu grau elevado). Contudo, esta consistia num tipo de função também relativamente simples e elementar. As funções exponencial e hiperbólica podiam ser consideradas as mais complexas, por serem transcendentais. No entanto, a primeira tinha a vantagem de necessitar de apenas dois parâmetros. Por outro lado, o formato da segunda tinha sido especificamente construído para que fosse a função ideal que melhor se encaixava nas observações efetuadas.

Os dois métodos utilizados para a obtenção dos parâmetros também envolviam processos de diferentes complexidades. No geral, os métodos de interpolação eram mais simples, rápidos e computacionalmente menos pesados que os métodos de regressão. A obtenção da *spline*, por exemplo, envolvia apenas simples interpolações lineares de ponto em ponto. No caso da exponencial, esta tinha a vantagem de poder ser linearizada com o cálculo do seu logaritmo, simplificando a interpolação. No caso da polinomial, o processo complicava-se um pouco mais, pois envolvia a determinação da inversa de uma matriz e multiplicação matricial. Ainda assim, a metodologia mais complexa de interpolação correspondia à da função hiperbólica, uma vez que era necessário recorrer-se a análise numérica para se solucionar o problema. Relativamente aos métodos de regressão, estes apresentavam ainda mais complexidade do que os anteriores. Para além de envolverem métodos numéricos computacionalmente pesados e de natureza iterativa, o número de pontos de calibração era muito elevado e tornava o processo mais lento. No entanto, a vantagem da regressão em relação à interpolação era não forçar as funções através dos pontos, ajustando-as melhor à tendência geral dos mesmos sem serem consideravelmente afetadas por cada um em específico.

Os parâmetros das funções de medição calculados com os métodos de interpolação e regressão encontram-se nas tabelas 4.1 e 4.2, respetivamente. As curvas produzidas pelas funções, utilizando os respetivos parâmetros, podem ser visualizadas nas figuras 4.1 e 4.2. Para efeitos de comparação, as curvas também foram sobrepostas nos gráficos das figuras 4.3 e 4.4. Observando de uma forma geral as funções, todas aparentavam seguir corretamente a tendência dos pontos de calibração, pelo menos ao longo da maior parte do intervalo de tensões. No entanto, algumas falhavam em certas zonas. No caso da *spline*, a reta do segmento da extremidade prolongava-se continuamente até atingir a pressão zero, que ocorria a uma tensão inferior àquela que se sabia ocorrer na realidade. A função exponencial também sofria de um problema semelhante, pois decaía demasiado rápido a partir de uma certa tensão, atingindo pressões inferiores àsquelas que os pontos de calibração indicavam. A função polinomial aparentava ser melhor que as duas anteriores quanto a esse problema. No entanto, o polinómio apresentava oscilações que não iam de encontro com

Tabela 4.1: Parâmetros das funções de medição obtidos a partir dos métodos de interpolação.

Parâmetro c_j	Função Exponencial	Função Polinomial	Função Hiperbólica
c_1	982,4105	8,8371	24,7177
c_2	-4,8411	-70,0505	9,7472
c_3	-	206,4107	2,7967
c_4	-	-268,6219	0,1714
c_5	-	130,8109	-

o verdadeiro comportamento do sistema. A função que melhor modelava este comportamento era a hiperbólica, pois a sua curva mantinha-se totalmente sobreposta aos pontos de calibração. Para além de existirem diferenças entre os tipos de funções, os métodos de interpolação e regressão também produziam curvas distintas dentro de cada tipo, pois os parâmetros resultantes não coincidiam em ambos. A utilização de pontos provenientes de compressão ou descompressão, no caso dos métodos de regressão, também resultava em parâmetros diferentes e, consequentemente, as respetivas curvas eram distintas.

Tabela 4.2: Parâmetros das funções de medição obtidos a partir dos métodos de regressão. Foram calculados dois conjuntos de parâmetros, com os pontos de calibração provenientes da compressão e da descompressão.

	Parâmetro c_j	Função Exponencial	Função Polinomial	Função Hiperbólica
Compressão	c_1	738,5689	5,8451	22,8283
	c_2	-4,5941	-48,4888	9,0535
	c_3	-	149,6133	2,7007
	c_4	-	-203,7975	0,1543
	c_5	-	103,8039	-
Descompressão	c_1	992,5016	9,5217	19,1963
	c_2	-4,8629	-73,9810	8,9382
	c_3	-	214,3822	1,9327
	c_4	-	-275,0927	0,1951
	c_5	-	132,4195	-

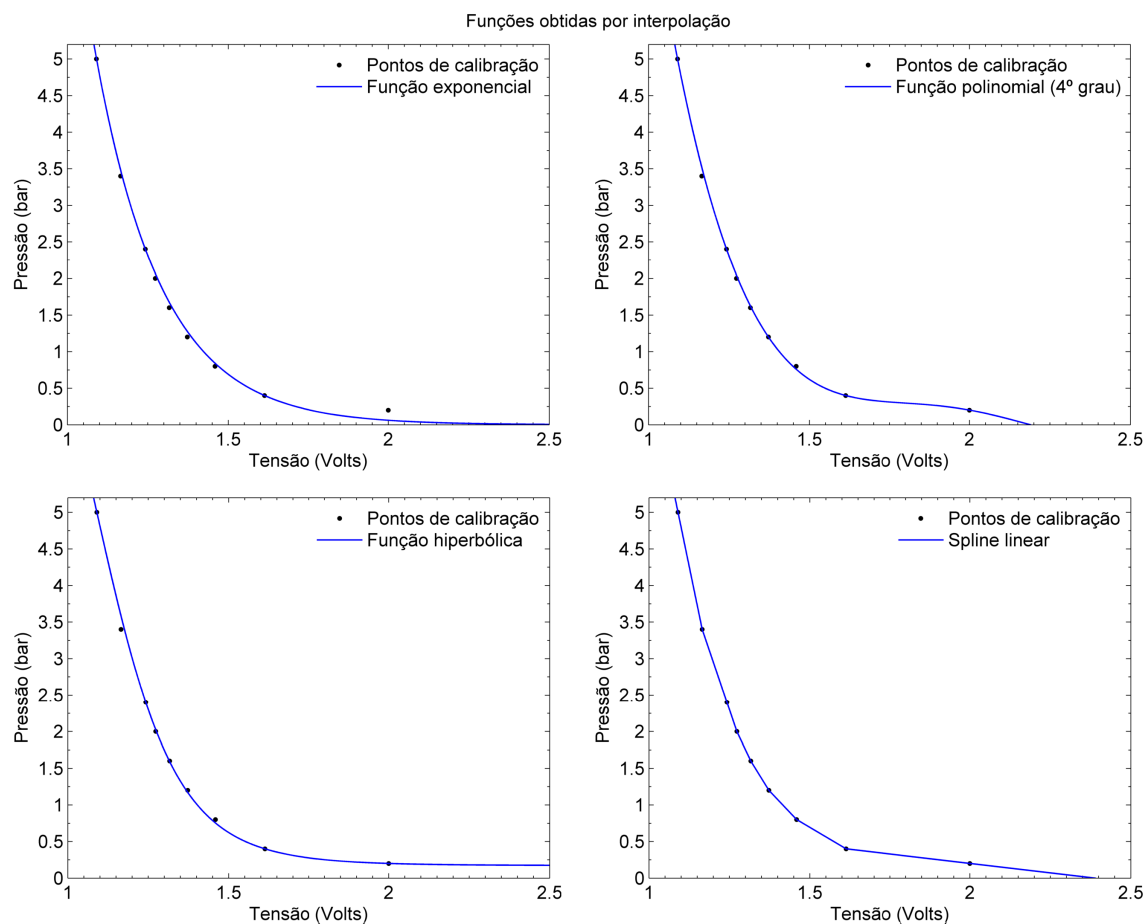


Figura 4.1: Curvas das funções de medição obtidas através dos métodos de interpolação. Gráfico superior esquerdo: função exponencial. Gráfico superior direito: função polinomial de 4º grau. Gráfico inferior esquerdo: função hiperbólica. Gráfico inferior direito: *spline* linear. Os pontos negros presentes em todos os gráficos correspondem aos pontos de calibração obtidos no teste estático.

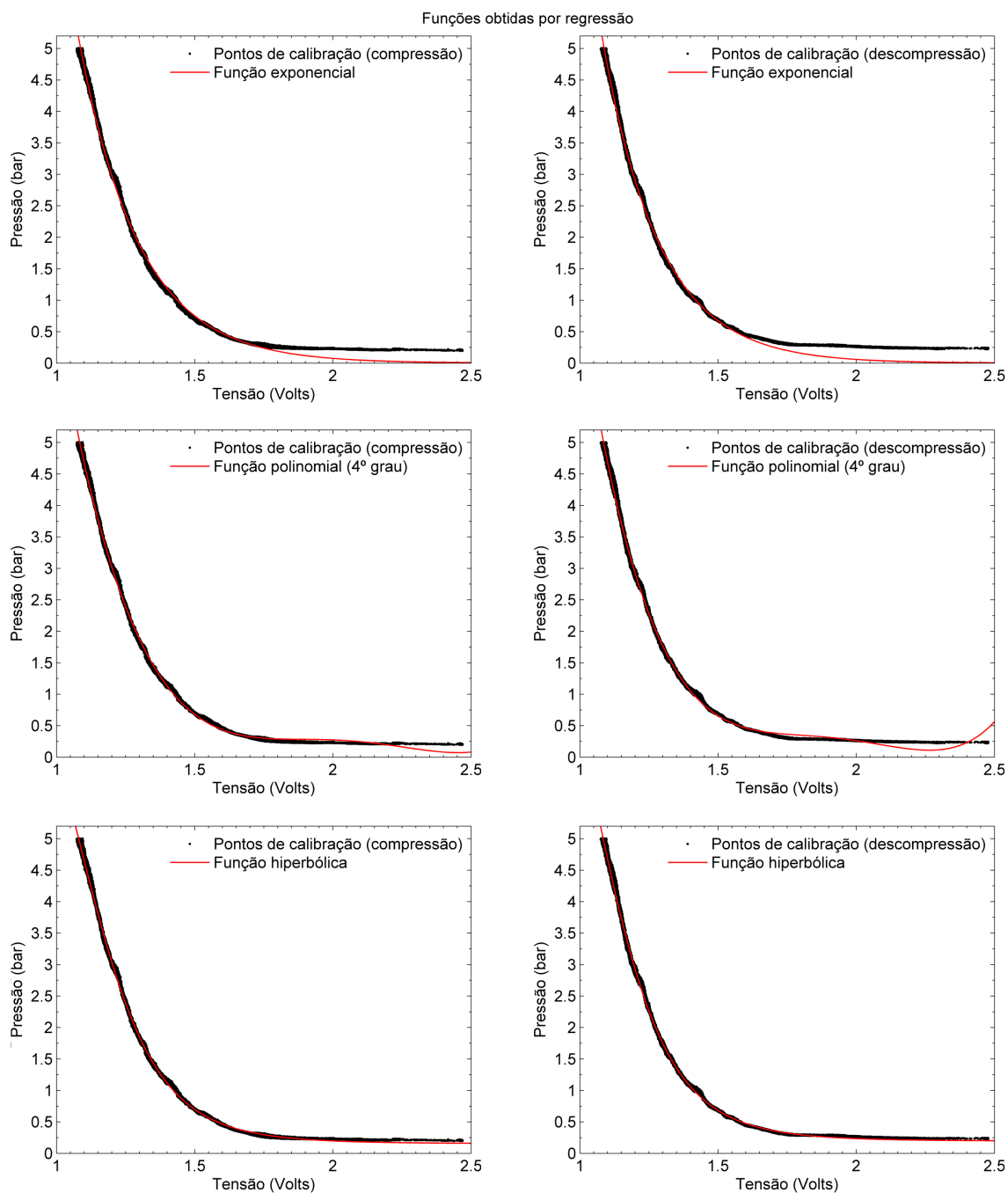


Figura 4.2: Curvas das funções de medição obtidas através dos métodos de regressão. As linhas de gráficos, de cima para baixo, correspondem às funções exponencial, polinomial de 4º grau e hiperbólica, respetivamente. As colunas de gráficos, da esquerda para a direita, correspondem às funções obtidas com os pontos de calibração provenientes da compressão e da descompressão, respetivamente. Em todos os gráficos, os pontos negros representam os pontos de calibração obtidos no teste dinâmico.

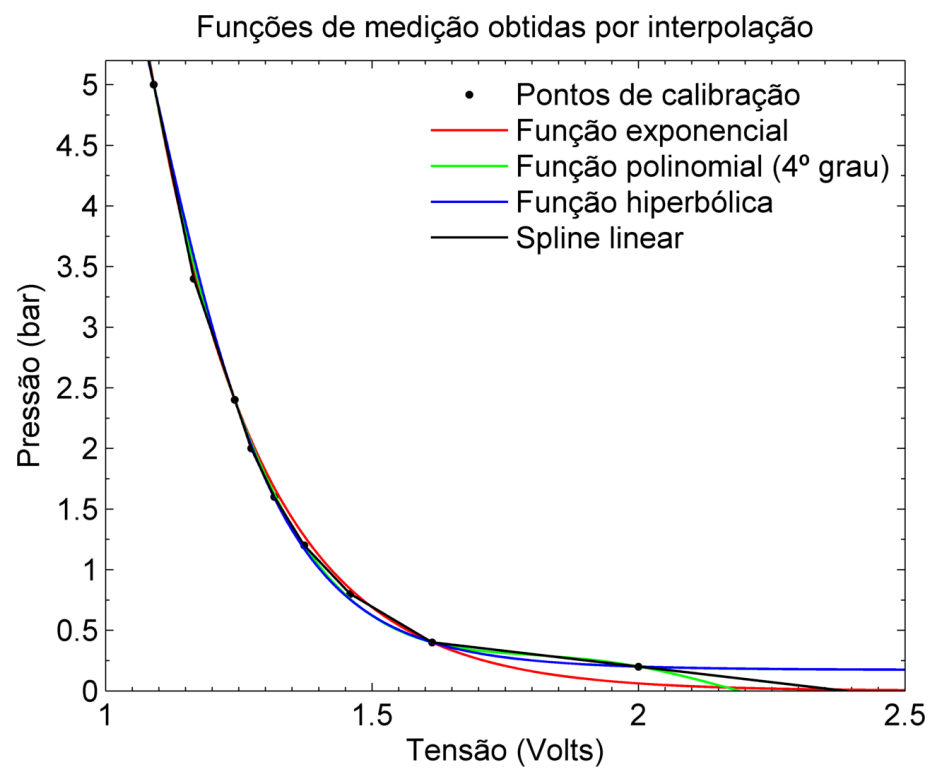


Figura 4.3: Gráfico de comparação das funções obtidas por interpolação. Todas as funções presentes na figura 4.1 encontram-se sobrepostas.

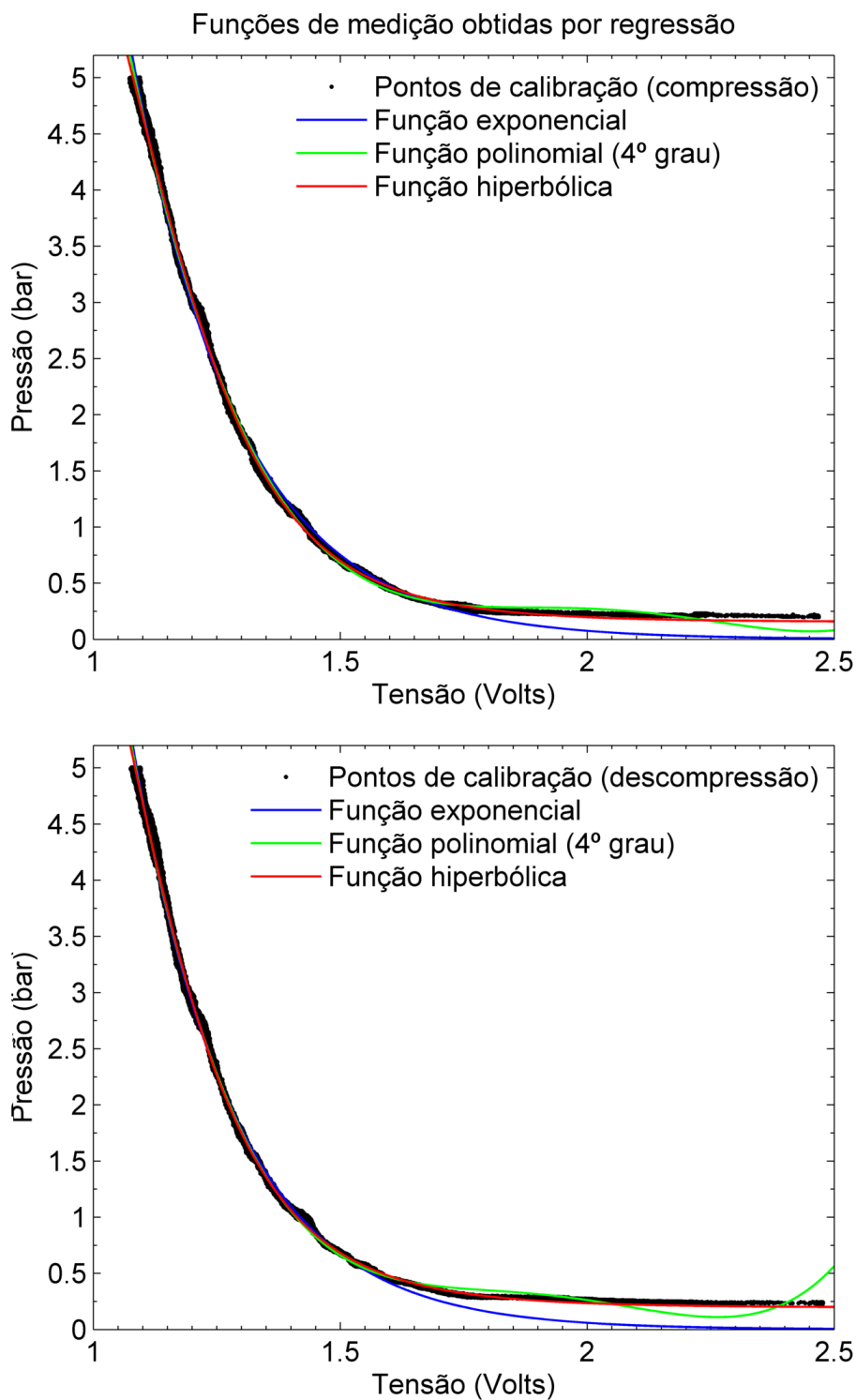


Figura 4.4: Gráficos de comparação das funções obtidas por regressão. As funções presentes na figura 4.2 encontram-se sobrepostas em dois gráficos distintos: o superior corresponde às de compressão e o inferior corresponde às de descompressão.

4.4 Implementação do Modelo

A partir do modelo de medição desenvolvido anteriormente (secção 2.7) já se conseguiam obter estimativas da pressão, pois tinha-se estabelecido a relação entre a tensão produzida e a pressão exercida. Nesse momento, a calibração podia ser considerada como terminada. No entanto, pretendia-se que os resultados de medição fossem obtidos diretamente a partir do sistema, com o modelo integrado no seu funcionamento. Passou-se então à fase de implementação.

Dada a natureza do modelo de medição, a sua implementação requereu o desenvolvimento de um algoritmo. Este foi programado em Matlab® e executado no computador portátil onde se fazia a aquisição de sinal. Desta forma, podia-se considerar que o modelo ficava integrado no funcionamento do sistema. O algoritmo tinha acesso aos valores de tensão, que eram medidos pela placa de aquisição, e aos parâmetros das funções de medição, que se encontravam guardados na memória do computador. A partir destes *inputs*, eram produzidos como *outputs* os valores estimados da pressão exercida. O funcionamento do algoritmo ocorria *offline*, isto é, os *outputs* ocorriam após a aquisição do sinal de tensão, em vez de ocorrerem durante a mesma. Naturalmente que para uma eventual utilização normal do TUNE, o algoritmo deveria ser adaptado para correr *online* no próprio dispositivo, acedendo aos parâmetros de calibração específicos de cada célula sensível de cada palmilha através dos elementos de memória internos. Não se optou por um funcionamento *online* uma vez que a aplicação do sistema ocorreu apenas em condições experimentais e não havia necessidade se obterem resultados de medição em tempo real.

A primeira tarefa do algoritmo consistia na filtragem do sinal de tensão para se reduzir o ruído. O filtro utilizado era novamente o de mediana móvel, com uma janela de 100 ms (descrito na secção 3.5). A tarefa seguinte consistia no cálculo das estimativas de pressão, a partir das funções de medição. O algoritmo permitia que se configurasse o tipo de função a utilizar (exponencial, polinomial, hiperbólica ou *spline* linear) e os parâmetros associados a cada função (se tinham sido obtidos por interpolação ou regressão, e se correspondiam à compressão ou descompressão). Os modelos de compensação de *drift* e histerese podiam também ser ativados ou desativados.

No final deste passo, o sistema tornava-se funcional para efeitos de medição de pressão, pois integrava o modelo de medição no seu funcionamento. O seu diagrama anterior (secção 3.3) podia então ser redesenhado, passando a ter o aspeto encontrado na figura 4.5.

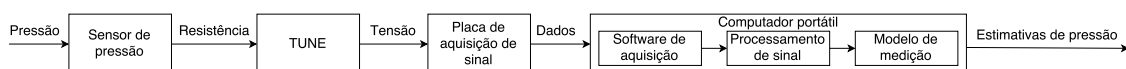


Figura 4.5: Diagrama do sistema, incluindo o modelo de medição.

4.5 Teste de Verificação da Calibração

4.5.1 Metodologia

A fase anterior permitiu que o sistema se tornasse funcional para efeitos de medição de pressão. No entanto, ainda se desconhecia a eficácia do mesmo, isto é, se produzia resultados que podiam ser considerados corretos e fidedignos. Portanto, pretendia-se principalmente verificar se a calibração tinha sido bem sucedida e se o sistema era fiável para executar a sua função.

Nesta fase, o sistema foi submetido a um teste de verificação da calibração, com o objetivo de se determinar a exatidão e precisão do sistema, calculando-se o erro e incerteza de medição. Para além disso, outro objetivo era a determinação da melhor metodologia de calibração. Este teste foi realizado com o mesmo equipamento e nas condições planeadas para os testes experimentais anteriores (secção 3.4), principalmente por se poderem considerar os valores de pressão produzidos pela máquina como os verdadeiros valores da mensuranda. Realizaram-se dois tipos de ensaios para este teste:

1. O primeiro testava o sistema em situações semelhantes aquelas a que foi sujeito durante a calibração. A máquina foi programada para exercer uma compressão seguida de uma descompressão, ao longo do intervalo de pressões desde $p_{\min} = 0$ bar até $p_{\max} = 5$ bar. Este intervalo possuía 9 patamares de pressão constante, que duravam $\Delta t = 50$ s e ocorriam sob as mesmas pressões utilizadas no teste estático (tabela 3.3 da secção 3.6). A transição de um patamar para o próximo ocorria com uma variação linear de pressão, à velocidade de 0,2 bar/s, a mesma utilizada no teste dinâmico (secção 3.5). A figura 4.6 demonstra como a pressão variava ao longo de um ensaio deste tipo.
2. O segundo submetia o sistema a novas situações ainda não experimentadas, diferentes daquelas em que foi calibrado, para que se pudesse estudar até que ponto poderia funcionar corretamente de forma independente. Este ensaio assemelhava-se ao anterior, mas os parâmetros programados eram diferentes. O intervalo de pressões ocorria desde $p_{\min} = 0$ bar até $p_{\max} = 5,05$ e estava dividido em 13 patamares equidistantes. Este número foi escolhido aleatoriamente para que a atuação dos sensores ocorresse com uma certa imprevisibilidade (em vez de se manter a pressão constante em valores já conhecidos). A velocidade das transições entre patamares equivalia a 0,02 bar/s, bastante mais baixa do que o ensaio anterior. O sinal de pressão deste tipo de ensaio encontra-se exemplificado na figura 4.7.

A máquina foi programada da forma descrita em ambos os tipos de ensaio para se testarem simultaneamente situações estáticas e dinâmicas, incluindo as transições de uma para a outra. Os patamares de pressão constante representavam as situações estáticas, a partir das quais se podiam extrair medições de *drift* (devido ao Δt bastante prolongado). As rampas entre os patamares representavam as situações dinâmicas. O facto de se terem executado duas abordagens de variação de pressão (compressão e descompressão) permitia que se medisse a histerese. Realizaram-se 3 ensaios de cada tipo, com a célula sensível anterior da palmilha de tamanho S do pé esquerdo.

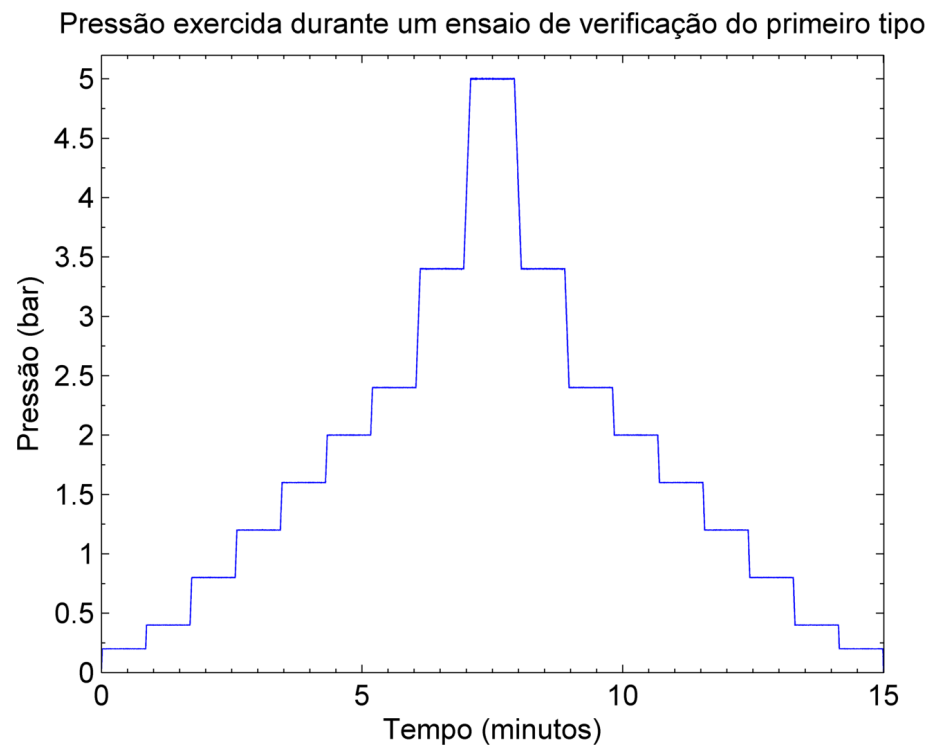


Figura 4.6: Sinal da pressão exercida nos ensaios de verificação do 1º tipo.

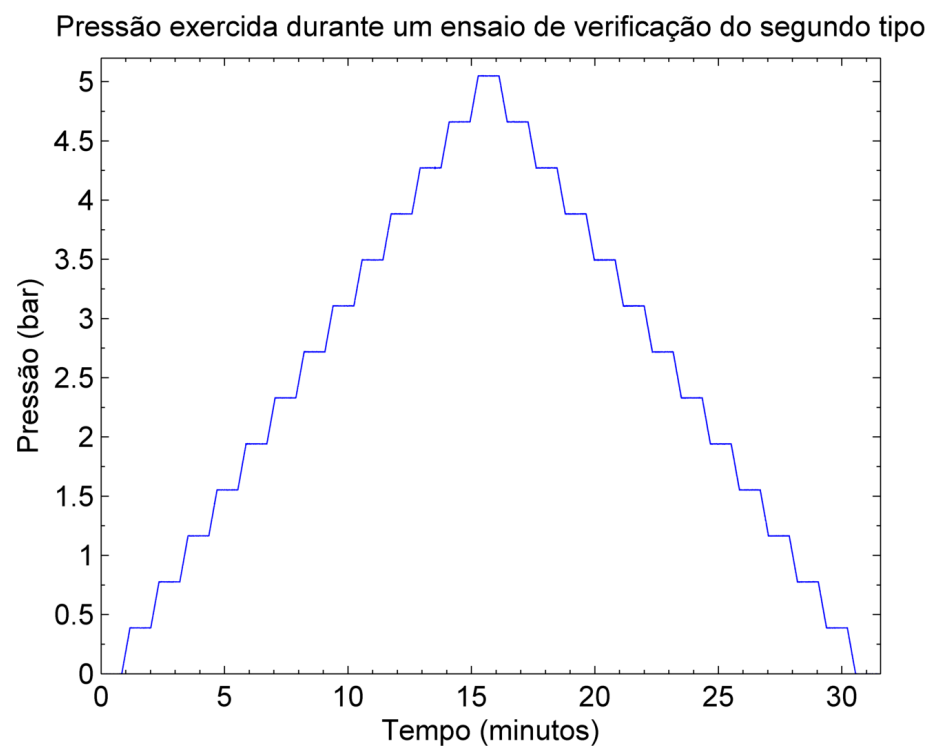


Figura 4.7: Sinal da pressão exercida nos ensaios de verificação do 2º tipo.

Os dados provenientes dos ensaios do 1º tipo foram tratados em primeiro lugar. Começou-se por colocar em funcionamento o algoritmo implementado na fase anterior (secção 4.4). A partir do mesmo, produziram-se estimativas da pressão com as várias configurações do modelo de medição, utilizando-se todos os tipos de função e parâmetros provenientes tanto da interpolação como da regressão. Pretendiam-se comparar os resultados de diferentes metodologias de calibração. A comparação foi efetuada com a sobreposição das curvas da verdadeira pressão p e da pressão estimada \hat{p} , ao longo do tempo. Produziram-se ainda gráficos de \hat{p} em função de p . O erro absoluto das medições, isto é, o módulo da diferença entre \hat{p} e p , também foi determinado em todos os pontos. A correspondente média aritmética foi considerada a medida representativa do erro de medição geral. Para se determinar a incerteza de medição, calculou-se o desvio-padrão das medições obtidas durante os patamares de pressão constante. Por fim, estudou-se a influência do algoritmo de compensação de *drift* e histerese, tanto nas próprias medidas como no erro e incerteza resultante. Com base nos resultados obtidos, determinou-se a melhor metodologia de calibração. O modelo de medição do sistema foi então configurado para utilizar os parâmetros relacionados com a metodologia escolhida. Os dados provenientes dos ensaios do 2º tipo foram tratados de forma semelhante, já com a configuração referida.

4.5.2 Análise de Resultados

Ao visualizarem-se os gráficos da pressão em função do tempo, verificou-se imediatamente em todos que a curva da pressão estimada apenas coincidia parcialmente com a curva da verdadeira pressão (exemplificado na figura 4.8). As diferenças mais evidentes encontravam-se nas zonas dos patamares, devido ao facto da pressão exercida ser constante nessas zonas. Isto causava logo à partida um erro de medição permanente característico da pressão em questão, que se propagava ao longo de todo o patamar. Para além disso, o efeito de *drift* agravava ainda mais o desvio observado entre as duas curvas. Esta diferença ainda se mantinha evidente nas zonas de transição entre os patamares e as rampas. Porém, à medida que ocorria a transição, as curvas tendiam a aproximar-se uma da outra. Era maioritariamente nas zonas das rampas que os resultados de medição se encontravam mais próximos dos verdadeiros valores de pressão, ou seja, os erros apresentavam-se menores. Por este motivo, o sistema aparentava ser mais exato em situações dinâmicas do que estáticas. Contudo, independentemente da situação, o sistema produzia medições continuamente afetadas por erros ao longo de todo o intervalo de pressões de interesse.

Observou-se também que o sinal da pressão estimada apresentava mais ruído quando as pressões exercidas se tornavam mais elevadas. Isto indicava que o modelo de medição era mais sensível quando a tensão atingia valores mais baixos, uma vez que a derivada das funções de medição tornava-se mais alta. Nessas situações, pequenas variações de tensão traduziam-se em grandes variações da pressão estimada. Logo, o ruído do sinal de tensão passava ser bastante mais evidente nos resultados de medição. A redução do ruído poderia eventualmente ser efetuada com um melhor isolamento dos fios e conexões dos sensores, ou uma melhor filtragem analógica e digital do sinal de tensão.

Os gráficos da pressão estimada em função da verdadeira pressão também foram analisados. Estes permitiam que se visualizasse até que ponto os resultados de medição se desviavam daqueles que seriam ideais. Geralmente, a curva da pressão estimada mantinha-se relativamente perto da ideal na zona das pressões mais baixas (sem se incluir a zona morta de funcionamento). No entanto, na zona das pressões mais elevadas, havia a tendência para a pressão estimada ser inferior à exercida (evidenciado na figura 4.9). Este aspeto poderia ser causado se as funções de medição não refletissem corretamente a tendência do comportamento do sistema sob pressões elevadas. No entanto, anteriormente tinha-se verificado o contrário, quando se compararam as curvas das funções com os pontos de calibração, durante a fase de desenvolvimento do modelo de medição (secção 4.3). O mais provável era que o sistema se estivesse a comportar de forma diferente daquela em que tinha sido calibrado.

Como medida comparativa entre os diferentes métodos de calibração, calcularam-se os erros de medição obtidos com cada um. Os resultados gerais encontram-se na tabela 4.3. Pretendia-se escolher a melhor função de medição e o melhor método de obtenção dos parâmetros associados. Os erros obtidos com cada uma das funções (independentemente do método) encontram-se na tabela 4.4. Verificou-se que o tipo de função tinha influência nos resultados produzidos, existindo diferenças estatisticamente significativas entre eles. A *spline* linear, apesar de ser a função mais simples, apresentava o menor erro de medição. Porém, este resultado poderia estar influenciado pelo próprio tipo de ensaio realizado, no qual todos os patamares correspondiam às pressões a partir das quais a *spline* tinha sido obtida. Logo, era natural que esta atingisse bons resultados nesta situação em específico. Por este motivo, a *spline* provavelmente não continuaria a ser a melhor noutras situações de atuação dos sensores. Entre as restantes funções, os resultados produzidos pela função hiperbólica eram os melhores, possivelmente por ser a que melhor se adequava às observações do comportamento do sistema (evidenciado anteriormente na secção 4.3). Apesar de ser mais complexa do que a exponencial e polinomial, o menor erro obtido compensava a sua utilização.

Os erros de medição produzidos com os métodos de interpolação e regressão (independentemente da função) também foram comparados, encontrando-se na tabela 4.5. Verificou-se que o erro atingido com o primeiro era significativamente mais baixo do que o segundo. Inicialmente previa-se que a regressão produzisse melhores resultados, não só devido à grande densidade de pontos de calibração (evidenciando em pormenor o comportamento do sistema), mas também por ajustar e encaixar da melhor forma possível as funções na tendência observada. No entanto, os resultados apresentavam o inverso. Era possível que o tipo de ensaio realizado estivesse novamente a influenciar os mesmos. A interpolação tinha sido executada com os pontos de calibração provenientes de situações estáticas, ao contrário da regressão, em que as situações eram dinâmicas. Como os ensaios realizados envolviam maioritariamente situações estáticas (patamares bastante longos em relação às rampas), era natural que a primeira produzisse melhores resultados. Mesmo assim, devido à interpolação envolver métodos mais rápidos e menos complexos, era preferível utilizá-la em vez da regressão. Numa eventual automação do processo de calibração, este aspeto seria uma vantagem.

Relativamente à incerteza de medição, esta foi calculada e comparada entre todos os métodos de calibração (tabela 4.6). Verificou-se que não existiam diferenças estatisticamente significativas entre os resultados. Logo, em vez de ser dependente do método de calibração, a incerteza era intrínseca ao próprio sistema. Esta estava diretamente relacionada com o ruído do sinal de tensão. Se o sinal apresentasse menos ruído, a dispersão dos resultados de medição nos patamares seria menor. Consequentemente, o sistema seria mais preciso e a incerteza diminuiria.

A histerese presente nas medições também foi um dos objetos de estudo, pois pretendia-se verificar se o seu algoritmo de compensação produzia o efeito desejado. Os resultados encontram-se na tabela 4.7. Verificou-se que o algoritmo não reduzia a histerese resultante, aliás, não tinha qualquer efeito significativo na mesma. A causa provável do ocorrido encontrava-se nas funções de medição do modelo de compensação. Este funcionava de forma a equilibrar continuamente o contributo das funções de compressão e descompressão. As constantes alterações do peso atribuído a cada uma acabou induzir diferenças entre os resultados de medição das duas abordagens de variação de pressão, em vez de as reduzir. Para além da histerese, a incerteza das medições também permanecia semelhante. A única medida em que ocorria uma redução estatisticamente significativa era no erro absoluto de medição. Isto devia-se à adaptação do algoritmo a cada situação de variação de pressão, utilizando os parâmetros de compressão ou descompressão das funções conforme fossem mais adequados. Apesar de se obterem erros um pouco menores, a diferença não compensava o facto do algoritmo não ter o seu devido efeito na própria histerese. Portanto, era preferível que este permanecesse desativado.

Ao contrário do anterior, o algoritmo de compensação de *drift* produzia efeitos consideráveis. Os resultados encontram-se na tabela 4.8. Verificou-se que a taxa de *drift* tornava-se significativamente reduzida com o algoritmo ativado. Logo, este funcionava de acordo com o planeado. Uma vez que o algoritmo mantinha o valor de tensão constante durante as situações estáticas de pressão, o próprio ruído do sinal também era eliminado. Por este motivo, a incerteza de medição também se apresentava consideravelmente mais baixa. Contudo, o erro de medição não sofria alterações, pois o desvio característico das pressões estimadas em cada patamar não era eliminado, permanecendo constante. Apesar dos resultados do algoritmo serem favoráveis, este era um pouco pesado do ponto de vista computacional e provavelmente não se justificaria a sua ativação numa eventual utilização independente do TUNE.

Após se ter concluído que a melhor função era a hiperbólica, com os parâmetros obtidos por interpolação, e que a compensação de *drift* e histerese deveriam ser desativadas, utilizou-se esta configuração no modelo de medição para se produzirem resultados com os dados do 2º tipo de ensaio. Os gráficos das pressões em função do tempo foram primeiramente observados (figura 4.10), seguidos dos gráficos da pressão estimada em função da verdadeira (figura 4.11). Inesperadamente, verificou-se que os resultados produzidos possuíam erros enormes ao longo de todo o intervalo de pressões. As medições efetuadas pelo sistema não eram minimamente fidedignas devido à fraca exatidão apresentada. Uma possível explicação para o sucedido era que tivesse ocorrido alguma falha no sistema de medição ou na máquina de ensaios. No entanto, era pouco provável que esse fosse o problema, uma vez que todo o equipamento já tinha sido utilizado an-

Tabela 4.3: Erro absoluto de medição obtido com as diferentes metodologias de calibração (sem compensação de histerese nem de *drift*). Cada um dos valores apresentados corresponde à média \pm desvio-padrão, calculados a partir de $n = 2394462$ amostras. As unidades de medida encontram-se em bar.

Função	Interpolação	Regressão	
		Compressão	Descompressão
Exponencial	$0,0407 \pm 0,0311$	$0,0781 \pm 0,0471$	$0,0450 \pm 0,0420$
Polinomial	$0,0392 \pm 0,0326$	$0,0668 \pm 0,0538$	$0,0485 \pm 0,0430$
Hiperbólica	$0,0508 \pm 0,0414$	$0,0674 \pm 0,0549$	$0,0506 \pm 0,0486$
<i>Spline</i> linear	0.0337 ± 0.0347	-	-

teriormente em vários testes e ensaios, nos quais demonstrou ser eficaz, coerente e robusto. A principal diferença dos outros ensaios em relação a estes encontrava-se no modo de atuação dos sensores. A explicação mais provável era que o sistema se estivesse a comportar de forma diferente, devido a estar sujeito a novas situações diferentes daqueles em que tinha sido calibrado. Este problema originava-se nos próprios sensores, mais precisamente nas FSRs. Sabia-se à partida que este tipo de resistências era bastante sensível à forma como era atuada. Fatores como a velocidade e direção de atuação, o formato, material e área de superfície do atuador, tinham uma influência considerável na resposta produzida. Para além disso, mesmo que as condições não variassem, a resposta não era sempre igual. Isto foi observado anteriormente no teste dinâmico (secção 3.5), verificando-se uma fraca repetibilidade dos sensores, principalmente devido ao efeito de escada na resposta. Os degraus não ocorriam sempre às mesmas pressões e eram imprevisíveis, pois a ativação ou desativação das FSRs não era coerente. Nestes últimos ensaios realizados verificou-se precisamente esse efeito, mas agravado de forma exorbitante. A curva característica de reposta aparentava ser totalmente diferente em relação à dos ensaios anteriores (demonstrado na figura 4.12). Para além dos fatores referidos, também era provável que as propriedades dos materiais do sensor tenham sofrido modificações severas após tantos ensaios, ao ponto de provocarem a alteração observada. Se o sistema apresentava um comportamento assim tão irregular e sensível a diversos fatores, não se podia esperar que proporcionasse medições coerentes. Por este motivo, os resultados apresentados anteriormente nesta secção não podiam ser considerados válidos na generalidade das situações e condições de atuação.

A conclusão chave que se retirava deste teste de verificação é que a incoerência e irregularidade do comportamento do sistema impedia que este pudesse ser utilizado eficazmente como medidor de pressão, independentemente do processo de calibração executado. Logo, a calibração deste sistema com o objetivo de eventualmente se obterem dados quantitativos de pressão era inútil. A única aplicação adequada ao sistema seria para efeitos de avaliação qualitativa de pressão.

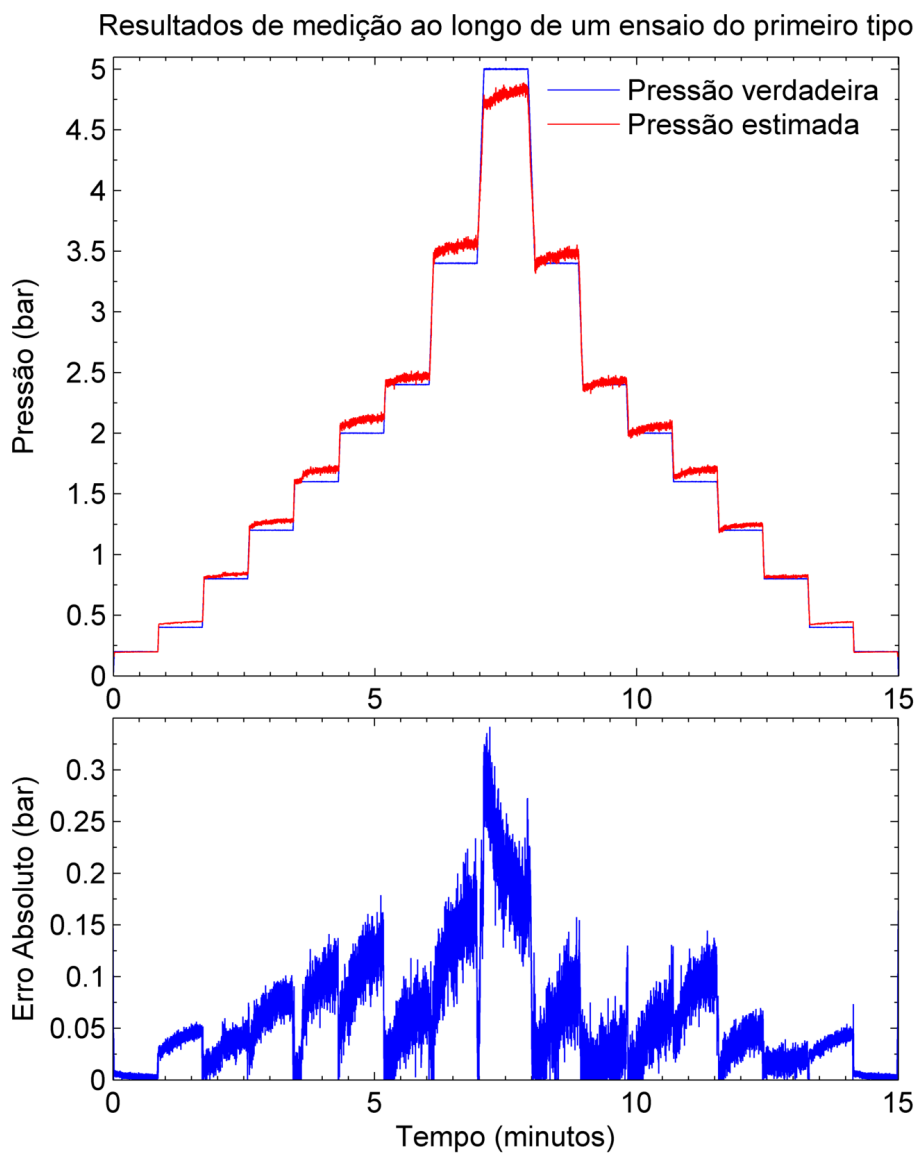


Figura 4.8: Gráfico superior: sobreposição das curvas das pressões verdadeira e estimada ao longo de um ensaio de verificação do 1º tipo. A pressão estimada presente no gráfico foi calculada a partir da função hiperbólica, com os parâmetros de compressão obtidos por regressão (sem compensação de histerese nem de *drift*). Gráfico inferior: erro absoluto, ou módulo da diferença entre as referidas curvas.

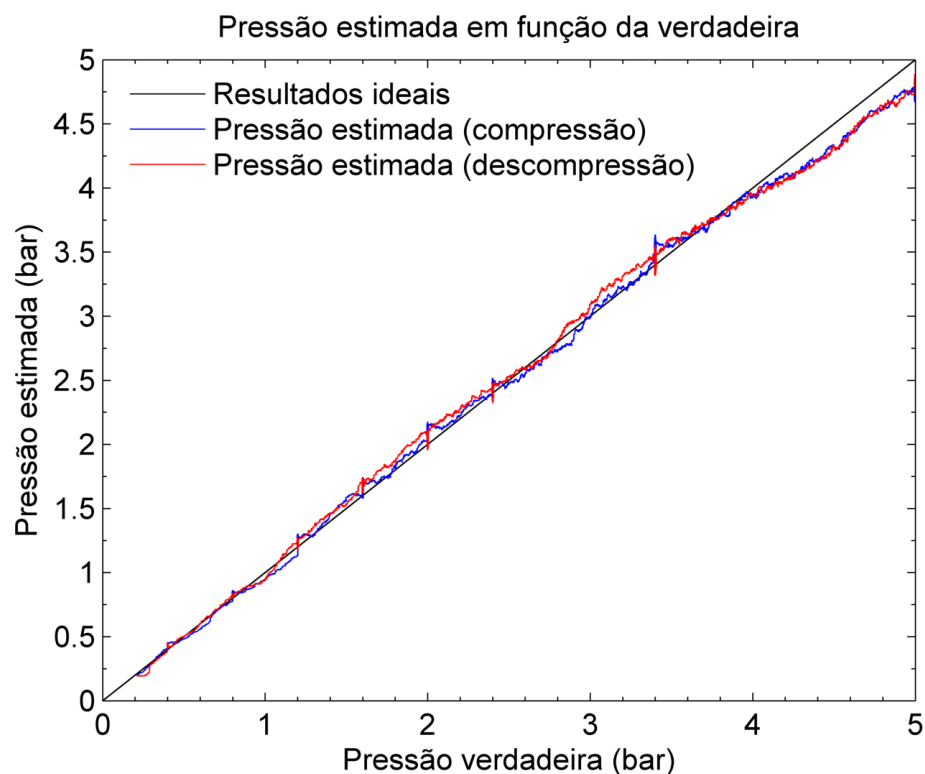


Figura 4.9: Pressão estimada em função da verdadeira, obtidas a partir de um ensaio de verificação do 1º tipo. A primeira foi calculada a partir da função hiperbólica, com os parâmetros de compressão obtidos por regressão (sem compensação de histerese nem de *drift*). A reta a negro representa os resultados ideais, ou seja, quando ambas as pressões coincidem uma com a outra.

Tabela 4.4: Comparação do erro absoluto de medição obtido com os diferentes tipos de função do modelo (sem compensação de histerese nem de *drift*). Os valores correspondem à média \pm desvio-padrão, calculados a partir das amostras resultantes dos métodos de regressão e interpolação combinadas ($n = 2394462$, para a *spline*, e $n = 7183386$, para cada uma das restantes funções). Existem diferenças estatisticamente significativas entre todos os erros ($p < 0,01$).

Função	Erro Absoluto (bar)
Exponencial	$0,0546 \pm 0,0439$
Polinomial	$0,0562 \pm 0,0455$
Hiperbólica	$0,0515 \pm 0,0492$
<i>Spline</i> linear	$0,0337 \pm 0,0347$

Tabela 4.5: Comparação do erro de medição resultante dos métodos de interpolação e regressão (sem compensação de histerese nem de *drift*). Os valores correspondem a média \pm desvio-padrão, calculados a partir das amostras resultantes de todas funções combinadas ($n = 9577848$, com o primeiro método, e $n = 19155696$, com o segundo método). Existem diferenças estatisticamente significativas entre os erros ($p < 0,01$).

Método	Erro Absoluto (bar)
Interpolação	$0,0411 \pm 0,0357$
Regressão	$0,0594 \pm 0,0500$

Tabela 4.6: Incerteza de medição obtida com as diferentes metodologias de calibração (sem compensação de histerese nem de *drift*). Cada um dos valores apresentados corresponde à média \pm desvio-padrão, calculados a partir de $n = 51$ amostras. As unidades de medida encontram-se em bar. Não existem diferenças estatisticamente significativas entre nenhum dos resultados ($p \gg 0,05$).

Função	Interpolação	Regressão	
		Compressão	Descompressão
Exponencial	$0,0200 \pm 0,0145$	$0,0196 \pm 0,0135$	$0,0198 \pm 0,0144$
Polinomial	$0,0204 \pm 0,0142$	$0,0194 \pm 0,0132$	$0,0197 \pm 0,0140$
Hiperbólica	$0,0200 \pm 0,0141$	$0,0192 \pm 0,0126$	$0,0192 \pm 0,0138$
<i>Spline</i> linear	$0,0197 \pm 0,0136$	-	-

Tabela 4.7: Resultados da utilização do algoritmo de compensação de histerese. Os valores representam média \pm desvio-padrão, obtidos a partir das amostras combinadas dos resultados de medição de todos os métodos de calibração. O erro absoluto com o algoritmo ativado é distintamente menor do que com o algoritmo desativado ($p < 0,01$). Os valores de histerese e incerteza não apresentam diferenças estatisticamente significativas ($p \gg 0,05$).

Algoritmo de Compensação	Histerese (%FSO)	Erro Absoluto (bar)	Incerteza (bar)
Ativado	$0,9044 \pm 0,6705$	$0,0500 \pm 0,0455$	$0,0230 \pm 0,0129$
Desativado	$0,8581 \pm 0,6588$	$0,0521 \pm 0,0457$	$0,0195 \pm 0,0134$

Tabela 4.8: Resultados da utilização do algoritmo de compensação de *drift*. Os valores representam média \pm desvio-padrão, obtidos a partir das amostras combinadas dos resultados de medição de todos os métodos de calibração. O *drift* e a incerteza com o algoritmo ativado são distintamente menores do que com o algoritmo desativado ($p < 0,01$). Os valores erro absoluto não apresentam diferenças estatisticamente significativas ($p \gg 0,05$).

Algoritmo de Compensação	<i>Drift</i> (bar/min)	Erro Absoluto (bar)	Incerteza (bar)
Ativado	$0,0127 \pm 0,0199$	$0,0548 \pm 0,0429$	$0,0064 \pm 0,0048$
Desativado	$0,0709 \pm 0,0512$	$0,0521 \pm 0,0457$	$0,0195 \pm 0,0134$

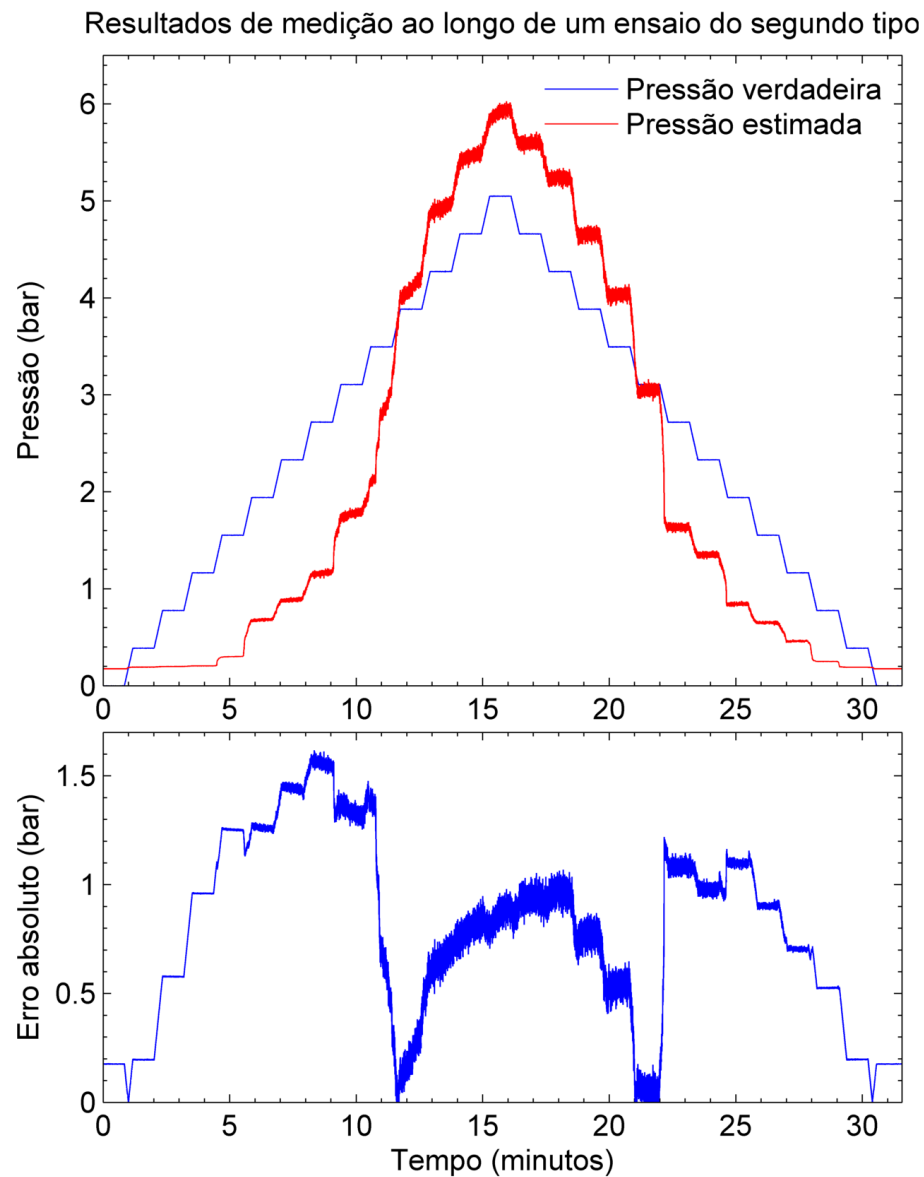


Figura 4.10: Gráfico superior: sobreposição das curvas das pressões verdadeira e estimada ao longo de um ensaio de verificação do 2º tipo. A pressão estimada presente no gráfico foi calculada a partir da função hiperbólica, com os parâmetros obtidos por interpolação (sem compensação de histerese nem de *drift*). Gráfico inferior: erro absoluto, ou módulo da diferença entre as referidas curvas.

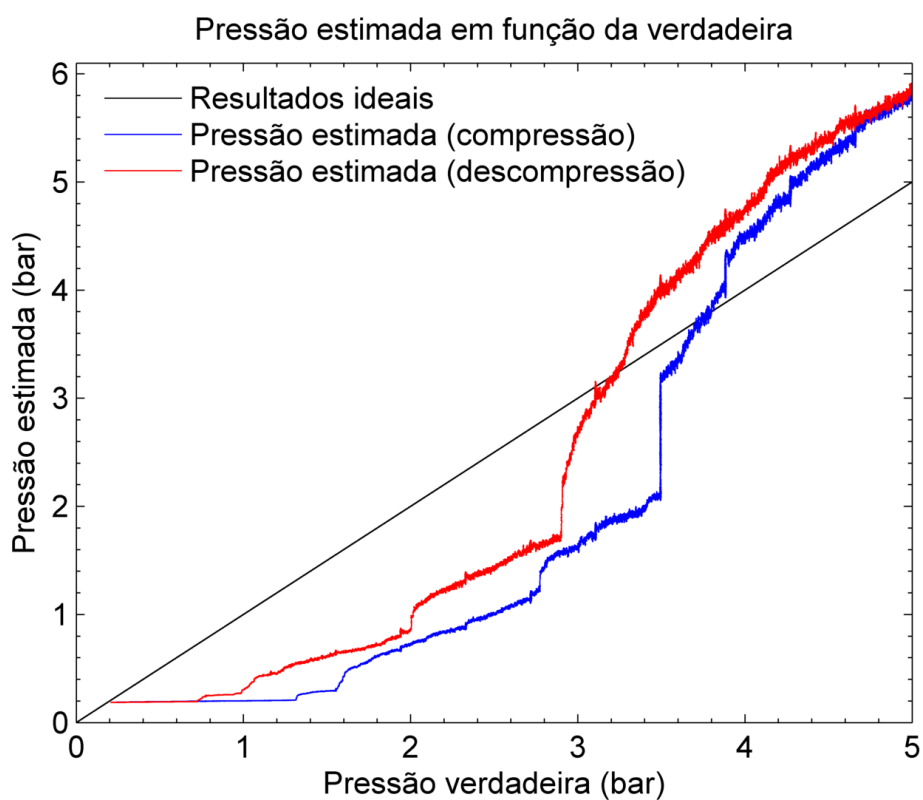


Figura 4.11: Pressão estimada em função da verdadeira, obtidas a partir de um ensaio de verificação do 2º tipo. A primeira foi calculada a partir da função hiperbólica, com os parâmetros obtidos interpolação (sem compensação de histerese nem de *drift*). A reta a negro representa os resultados ideais, ou seja, quando ambas as pressões coincidem uma com a outra.

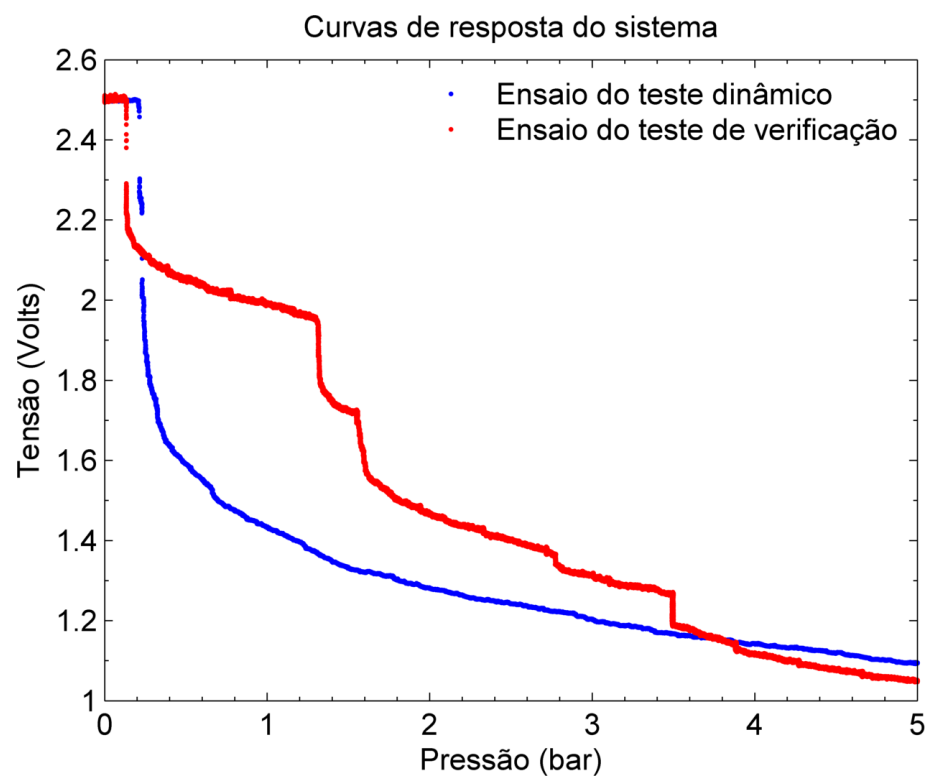


Figura 4.12: Comparação entre as curvas de resposta do sistema obtidas nos testes dinâmico e estático.

4.6 Considerações Finais do Capítulo

As informações qualitativas e os pontos de calibração extraídos dos testes associados ao primeiro passo de calibração foram utilizados durante o segundo passo. Este envolveu o desenvolvimento do modelo de medição. A sua estrutura base consistia numa função de medição. Consideraram-se quatro tipos de função, incluindo as três observadas na curva de resposta e uma *spline* linear. Os parâmetros das mesmas foram determinados por meio de interpolação e regressão. Desenvolveram-se ainda dois métodos de compensação de *drift* e histerese. No final, o modelo foi implementado em algoritmo e incluído no funcionamento do sistema, para que este pudesse produzir diretamente resultados de medição de pressão.

O teste de verificação permitiu que se avaliasse o desempenho do sistema, tanto em situações semelhantes como distintas daquelas em que tinha sido calibrado. Verificou-se que nas primeiras, o sistema era mais exato se a atuação do sensor fosse dinâmica em vez de estática. Para além disso, o erro de medição evidenciava ser maior sob pressões elevadas, não só devido a uma maior sensibilidade ao ruído do sinal, mas também por possíveis alterações imprevistas do comportamento do sistema. Outro aspeto estudado foi a eficácia dos diferentes métodos de calibração. Concluiu-se que a função de medição mais eficaz correspondia à hiperbólica, devido a ser a que melhor se adequava ao sistema. O melhor método de obtenção dos parâmetros correspondia à interpolação, principalmente por ser simples e produzir resultados satisfatórios. Relativamente ao algoritmo de compensação de histerese, este não teve a influência esperada na própria medida. Apesar de ter diminuído o erro dos resultados, o efeito resultante não compensava a sua ativação. Por outro lado, o algoritmo de compensação de *drift* reduziu consideravelmente este efeito, para além de ter melhorado a precisão do sistema. Contudo, não se justificava a sua ativação devido ao peso computacional.

Caso as situações fossem distintas daquelas em que o sistema tinha sido calibrado, o seu comportamento alterava-se totalmente. Isto era causado principalmente pelas características do sensor, que era muito sensível às condições e situações de atuação. A resposta produzida não era coerente pois dependia não só da pressão exercida, mas também de diversos fatores, alguns incontrolláveis e aleatórios. Por este motivo, o desempenho do sistema agravava-se consideravelmente quando sujeito a novas situações, não podendo ser utilizado eficazmente como medidor de pressão, independentemente do método de calibração. O sistema deveria ser utilizado apenas para avaliações qualitativas de pressão, em vez de medições quantitativas.

Capítulo 5

Conclusão

A pressão plantar é um fator de elevada importância não só para a saúde de pacientes com patologias que debilitem os pés, mas também para o desempenho de desportistas de uma grande variedade de modalidades. É essencial que as medições de pressão relacionadas estejam corretas para não induzirem os médicos ou especialistas em erro. Por este motivo, os sistemas de medição devem acima de tudo ser efetivamente calibrados. Esta dissertação focou-se precisamente neste tema, estabelecendo consenso acerca do significado de calibrar e das tarefas envolvidas no processo. Desenvolveu-se um modelo geral de calibração e uma estrutura teórica, metodológica e procedimental aplicável a qualquer tipo de sistema medidor. Como prova de conceito e demonstração da utilidade da referida estrutura, calibrou-se um sistema de medição de pressão plantar com o total apoio da mesma. Apesar dos resultados finais terem apresentado um sistema com fraco desempenho, o problema não se encontrava no procedimento de calibração, mas sim nas características do próprio sistema, não sendo adequadas para avaliações quantitativas de pressão. Por este motivo, a integridade da estrutura manteve-se firme e considera-se que poderá ter um papel essencial em qualquer calibração.

Referências

- [1] Marilyn Lord, David P Reynolds, e Janet R Hughes. Foot pressure measurement: A review of clinical findings. *Journal of Biomedical Engineering*, 8(4):283–294, 1986. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141542586900609>, doi:10.1016/0141-5425(86)90060-9.
- [2] Sarah Wild, Gojka Roglic, Anders Green, Richard Sicree, e Hilary King. Global prevalence of diabetes: estimates for the year 2000 and projections for 2030. *Diabetes care*, 27(5):1047–53, may 2004. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15111519>.
- [3] Bakker K et al. The year of the diabetic foot. *Diabetes Voice*, 50(1):11–14, 2005.
- [4] Peter R Cavanagh, F G Hewitt Jr, e J E Perry. In-shoe plantar pressure measurement: a review. *The Foot*, 2(4):185–194, 1992. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095825929290047S>, doi:10.1016/0958-2592(92)90047-S.
- [5] Abdul Hadi Abdul Razak, Aladin Zayegh, Rezaul K Begg, e Yufridin Wahab. Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. *Sensors (Basel)*, 12(7):9884–9912, 2012. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3444133/>, doi:10.3390/s120709884.
- [6] J Cobb e Dr D J Claremont. Transducers for foot pressure measurement: survey of recent developments. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 33(4):525–532, 1995. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02522509>, doi:10.1007/BF02522509.
- [7] D Rosenbaum e H P. Becker. Plantar pressure distribution measurements. Technical background and clinical applications. *Foot and Ankle Surgery*, 3(1):1–14, 1997. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1268773197800094>, doi:10.1046/j.1460-9584.1997.00043.x.
- [8] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, volume 3. 2008. doi:10.1016/0263-2241(85)90006-5.
- [9] Gert van der Horn e Johan H. Huijsing. *Integrated Smart Sensors: Design and Calibration*. 1998. URL: <https://books.google.pt/books/about/IntegratedSmartSensors.html?id=tC0ZTdZqiqUC&pgis=1>.
- [10] Alfred Nordman. *Standardization In Measurement: Philosophical, Historical and Sociological Issues*, volume 53. 2013. arXiv:arXiv:1011.1669v3, doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

- [11] Mike Cable. *Calibration: A Technician's Guide*. 2005. URL: <https://books.google.pt/books/about/Calibration{ }A{ }Technician{ }s{ }Guide.html?id=1LYZQV9J4ysC{&}pgis=1>.
- [12] Instrument Society of America e American National Standards Institute. *Electrical transducer nomenclature and terminology*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, N.C., 1982.
- [13] J. a. Flórez e a. Velásquez. Calibration of force sensing resistors (fsr) for static and dynamic applications. *2010 IEEE ANDESCON Conference Proceedings, ANDESCON 2010*, páginas 2–7, 2010. doi:10.1109/ANDESCON.2010.5633120.
- [14] E.P. Zehr, R.B. Stein, T. Komiyama, e Z. Kenwell. Linearization of force sensing resistors (FSR's) for force measurement during gait. Em *Proceedings of 17th International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*, volume 2, páginas 1571–1572. IEEE, 1995. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=579833>, doi:10.1109/IEMBS.1995.579833.
- [15] Bortolino Saggin, Diego Scaccabarozzi, e Marco Tarabini. Metrological Performances of a Plantar Pressure Measurement System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(4):766–776, apr 2013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6471220>, doi:10.1109/TIM.2013.2245185.
- [16] Rick S. Hall, Geoffrey T. Desmoulin, e Theodore E. Milner. A technique for conditioning and calibrating force-sensing resistors for repeatable and reliable measurement of compressive force. *Journal of Biomechanics*, 41(16):3492–3495, 2008. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.09.031.
- [17] N. K. Rana. Application of Force Sensing Resistor (FSR) in design of pressure scanning system for plantar pressure measurement. *2009 International Conference on Computer and Electrical Engineering, ICCEE 2009*, 2:678–685, 2009. doi:10.1109/ICCEE.2009.234.
- [18] Z.U. Abu-Faraj, G.F. Harris, J.J. Wertsch, J.H. Abler, e A.S. Vengsarkar. Holter system development for recording plantar pressures: design and instrumentation. Em *Proceedings of 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, páginas 934–935. IEEE, 1994. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=415220>, doi:10.1109/IEMBS.1994.415220.
- [19] M Zequera, S Stephan, e J Paul. The "PAROTEC" foot pressure measurement system and its calibration procedures (2005). *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference*, 1:4135–9, jan 2006. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17947069>, doi:10.1109/IEMBS.2006.259624.
- [20] C Matthews, F Pennecchi, S Eichstädt, A Malengo, T Esward, I Smith, C Elster, A Knott, F Arrhén, e A Lakka. Mathematical modelling to support traceable dynamic calibration of pressure sensors. *Metrologia*, 51(3):326–338, jun 2014. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/51/3/326>, doi:10.1088/0026-1394/51/3/326.
- [21] Jim Lally e Dan Cummiskey. *Dynamic Pressure Calibration*. 2005.

- [22] P. Yameogo, U. Heiba, M. Al Bahri, e P. Pons. Self calibrating pressure sensor for biomedical applications. Em *2009 IEEE Sensors*, páginas 691–694. IEEE, oct 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5398347>, doi:10.1109/ICSENS.2009.5398347.
- [23] Stephen Urry. Plantar pressure-measurement sensors. *Measurement Science and Technology*, 10(1):R16—R32, 1999. URL: <http://stacks.iop.org/0957-0233/10/i=1/a=017?key=crossref.b9be0a6ec0e74470bb144f208bb70fe3>, doi:10.1088/0957-0233/10/1/017.
- [24] Lisa Macintyre. New calibration method for I-scan sensors to enable the precise measurement of pressures delivered by 'pressure garments'. *Burns : journal of the International Society for Burn Injuries*, 37(7):1174–81, nov 2011. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030541791100194X>, doi:10.1016/j.burns.2011.06.008.
- [25] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer Science & Business Media, 2010. URL: <https://books.google.com/books?id=W0Emv9dAJ1kC{&}pgis=1>.
- [26] Edite M. G.P. Fernandes. *Computação numérica*, volume 546. 1997.
- [27] Zhang Xuefeng, Zhao Yulong, e Xu Yi. Design and Development of a Novel MEMS Force Sensor for Plantar Pressure Measurement. Em *2010 Third International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics*, páginas 1–5. IEEE, jul 2010. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5558174>, doi:10.1109/CENICS.2010.8.
- [28] Hasan Goksenin Cetin, Gokhan Ozturk, Yanki Celebi, e Ahmet Dindar. Design, calibration and measurement uncertainty analysis of a tension measurement test system. Em *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, páginas 1894–1899. IEEE, may 2015. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7151570>, doi:10.1109/I2MTC.2015.7151570.
- [29] Kai Guo. Research and realization of static calibration test for 6-D force sensor based on virtual instrument technology. Em *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, volume 1, páginas 102–105. IEEE, aug 2011. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6037689>, doi:10.1109/ICEMI.2011.6037689.
- [30] K. Sekiguchi, M. Ueda, H. Uno, H. Takemura, e H. Mizoguchi. Development and calibration of 6-axis force sensor for simultaneous measuring of plantar deformation. Em *2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, páginas 3138–3142. IEEE, oct 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4811778>, doi:10.1109/ICSMC.2008.4811778.
- [31] John S. Steinhart e Stanley R. Hart. Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 15(4):497–503, aug 1968. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011747168900570>, doi:10.1016/0011-7471(68)90057-0.

- [32] Zhiping Wang, Aidong Xu, Kai Wang, Yan Song, e Bingjun Yan. Research on the sensor calibration of pressure transmitter based on the least square method. Em *2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, páginas 389–392. IEEE, oct 2014. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7015034>, doi:10.1109/ICOSP.2014.7015034.
- [33] Wenjun Xie e Peng Bai. A pressure sensor calibration model based on Support Vector Machine. Em *2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, páginas 3239–3242. IEEE, may 2012. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6244512>, doi:10.1109/CCDC.2012.6244512.
- [34] Zongyu Geng, Feng Yang, Xi Chen, e Nianqiang Wu. Gaussian process based modeling and experimental design for sensor calibration in drifting environments. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 216:321–331, sep 2015. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400515004037>, doi:10.1016/j.snb.2015.03.071.
- [35] Sebastian Urban, Marvin Ludersdorfer, e Patrick van der Smagt. Sensor Calibration and Hysteresis Compensation With Heteroscedastic Gaussian Processes. *IEEE Sensors Journal*, 15(11):6498–6506, nov 2015. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7155465>, doi:10.1109/JSEN.2015.2455814.
- [36] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Número September. 2008. URL: [http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html\\$\\delimiter"026E30F\\$nhhttp://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM{ }100{ }2008{ }E.pdf](http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html$\\delimiter), doi:10.1373/clinchem.2003.030528.
- [37] S. V. Gupta. *Measurement Uncertainties: Physical Parameters and Calibration of Instruments*. Springer Science & Business Media, 2012. URL: <https://books.google.com/books?id=gVUObGhtRQYC{&}pgis=1>.
- [38] Reza Langari Alan S Morris. *Measurement and Instrumentation, 2nd Edition*. URL: <http://store.elsevier.com/product.jsp?locale=en{ }AU{&}isbn=9780128008843>.